

5. Chapitre 5 : Électrophysiologie Cellulaire

5.1 Introduction Et Généralités :

L'électrophysiologie étudie l'**activité électrique** des cellules **excitables** de l'organisme, telles que les cellules nerveuses (neurones) et les cellules musculaires (le muscle cardiaque et les muscles striés). Son but est **d'arriver à décrire et de comprendre** le fonctionnement des organes, à partir de l'**analyse** de l'enregistrement de l'**activité électrique** des cellules de ces derniers.

Cette activité électrique mesurable est la base des méthodes d'examens cliniques utilisées couramment dans la pratique médicale quotidienne.

5.2 Constitution D'une Chaîne De Mesure :

Les êtres vivants sont le siège de phénomènes électriques intimement liés aux activités vitales des organes. Le phénomène physiologique transmet un signal électrique (une intensité ou tension) et celui-ci est recueilli par un capteur adapté appliqué en surface ou introduit en profondeur dans les tissus. Généralement le signal est faible et ne peut être analysé, une amplification du signal nous permet de l'interpréter.

La chaîne de mesure est généralement formée par :



5.2.1. Capteurs Et Signaux Electro Physiologique.

Un capteur électro physiologique est un dispositif **très sensible**, qui permet de recueillir l'activité du phénomène physiologique sous forme de signal (charge, tension, courant, son...). En Général le signal est très faible et ne peut être analysé.

Puisque ces capteurs sont généralement appliqués au corps du patient, ils doivent **obéir aux différentes contraintes suivantes :**

- Très haute sensibilité, pour pouvoir capter le signal.
- Supportent la stérilisation dans le cas d'un multi usage.
- Résister aux agressions du corps humain.
- Provoquer le minimum de perturbation du signal mesuré, minimiser les effets de contacts.
- Fiabilité et stabilité de leurs caractéristiques.
- Haute sécurité du patient.



Un gel spécifique est utilisé afin de minimiser les effets de contact (les bruits).

L'information recueillie par le capteur est composée d'une information utile notée (S(t)) et appelée **signal**, et d'une information inutiles notée (B(t)) et appelée le **bruit**.

Cette information recueillie est une fonction du temps notée généralement notée X(t). Elle est donnée par :

$$X(t) = S(t) + B(t).$$

Avec X(t) est l'information totale recueillie par le capteur ;

S (t) est l'information utile le signal.

B (t) est le bruit ou l'information inutile.

Par exemple le **stéthoscope** permet de capter des **sons** qui proviennent du thorax. L'origine de ces sons captés peut être les sons des battements du cœur ou le son de l'air qui circule dans les poumons.

Pour le **cardiologue** le son qui provient des battements du cœur est l'information **principale** (**utile**) et celui qui provient de la circulation de l'air dans les poumons est l'information **secondaire** (**bruit**).

Pour le **pneumologue** le son qui provient de la circulation de l'air dans les poumons est l'information **principale** (**utile**), celle qui provient des battements du cœur est **secondaire** (**bruit**).

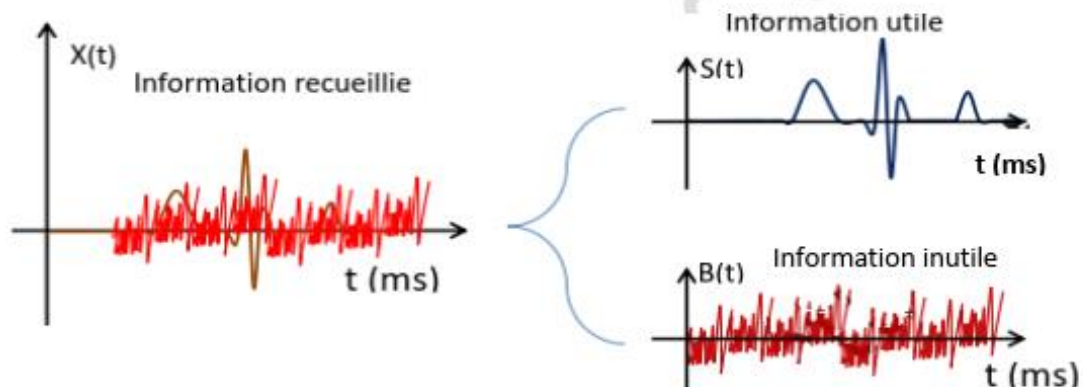


5.2.1.1. Informations Utile.

Cette information utile est émise par l'organe, elle est appelée **Signal**. Elle nous permet d'étudier le phénomène désiré. Le signal est toujours accompagné d'une information inutile.

5.2.1.2. Informations Inutile.

Cette information appelée aussi le **Bruit** (**parasite**) peut provenir d'autres organes (autres phénomènes physiologiques), comme elle peut être externe n'ayant aucune relation avec la physiologie du corps comme les effets de contacts. **Le bruit est inévitable.**



Il faut signaler qu'il existe deux natures de signaux recueillis.

- Les signaux résultants de l'activité électrique de la source, tel que les muscles, le cerveau ou le cœur.
- Les phénomènes biologiques qui doivent être traduits en phénomènes électriques.

5.2.2 Amplificateur.

L'amplificateur possède deux rôles principaux.

- **Séparer** l'information utile (signal) et l'information inutile (parasite) recueillie par le capteur.
- **Amplifier** l'information utile recueillie afin d'être analysé.

5.2.2. Enregistreurs :

Ils permettent d'enregistrer l'information amplifiée et traitée. Il existe deux types d'enregistrements :

5.2.2.1. Enregistreurs Sur Bande :

L'information est enregistrée sur une feuille millimétrée simplifiant l'analyse de l'information, tel qu'Électrocardiographe (ECG), électroencéphalographe (EEG) et électromyographe (EMG).

5.2.2.2. Enregistreurs Vidéo :

Ils permettent d'enregistrer des images telles que l'échographie, et la radiographie.

5.3. Électrophysiologie Cellulaire.

5.3.1. Généralités.

La membrane cellulaire a une perméabilité dite sélective, elle se laisse traverser par certaines substances mais pas par d'autres. Elle comporte des canaux et des pompes capables de réguler la répartition des ions de part et d'autre de la membrane.

Le passage de substance à travers la membrane peut se faire soit par :

- **Des Transports Passifs (Canaux Passifs)** : transport ne nécessitant aucune dépense d'énergie de la part de la cellule. Les transports passifs ont pour origine une "force" physique **extérieure** (non membranaire).
- **Des Transports Actifs (Canaux Actifs)** : transport nécessitant une dépense d'énergie de la part de la cellule. L'énergie nécessaire pour ce transport est fournie par un **mécanisme membranaire**.

5.3.2. Rôle Et Fonction D'une Cellule Excitable.

Le **rôle fondamental** d'une cellule excitable par exemple le neurone est de **recevoir propager et transmettre** l'information recueillie (signal nerveux).

Sa membrane plasmique possède des propriétés électrochimiques particulières. Elle peut réagir à un stimulus et propager son action jusqu'à sa terminaison nerveuse.

Remarque : La conduction du signal dans **un fil électrique** se fait par le biais du **flux d'électrons**, alors que dans le cas de la **membrane plasmique** c'est une onde **d'échange ionique** qui s'effectue à travers la **membrane cellulaire**. Cette propagation est de nature **électrochimique**.



5.3.3. Propriétés Électrique D'une Cellule :

L'électrophysiologie consiste à étudier les propriétés électriques des cellules. Ces propriétés dépendent des caractéristiques électrochimiques de la membrane cellulaire.

À l'état de base, toutes les cellules vivantes possèdent une répartition de charges différente entre le milieu **intra** et le milieu **extra** cellulaire. Ces charges électriques donnent à la cellule vivante des propriétés électriques.

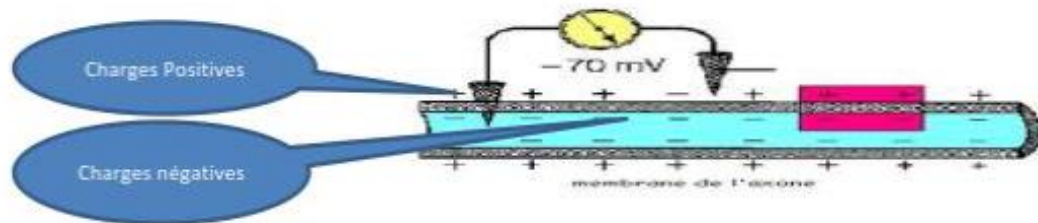
La répartition (concentration) des ions de part et d'autre de la membrane cellulaire est inégale.

[P⁻] : sont des molécules organiques, des protéines de charges négatives(HCO₃⁻), (PO₃)²⁻ et(COO⁻).

Intracellulaire (Milli mole/litre)	membrane	Extracellulaire (Milli mole/litre)
$[Na^+] = 10$ $[K^+] = 160$ $[Ca^{2+}] = 10^{-5}$ $[Cl^-] = 14$ [P]		$[Na^+] = 144$ $[K^+] = 4$ $[Ca^{2+}] = 1$ $[Cl^-] = 147$ [P]

5.3.4. Potentiel De Repos :

Deux électrodes très fines sont utilisées pour mesurer la différence de potentiel au niveau de la membrane cellulaire. L'une est placée dans le milieu extra cellulaire et l'autre dans le milieu intra cellulaire. La différence de potentiel est amplifiée et visualisée sur un oscilloscope.



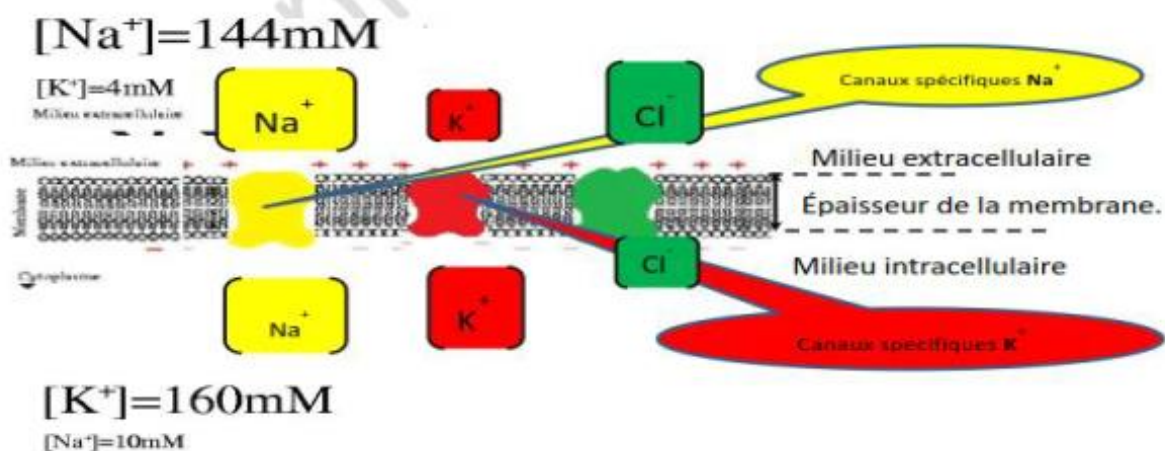
Lorsque la microélectrode pénètre dans la cellule, le potentiel devient brusquement négatif et reste stable en fonction du temps. La valeur de cette différence de potentiel membranaire (E_m) varie selon les types de cellules, elle est de l'ordre de -90 mV dans les fibres musculaires, de -65 mV dans les cellules du ventricule du cœur, de -85 mV dans l'oreillette.

Pour comprendre la différence de polarisation de repos au niveau de la membrane, Il faut connaître :

- **Les différentes forces responsables** du mouvement des ions à travers des canaux dits "de fuite" ouverts au repos,
- **Les équilibres de Donnan** (mouvements des particules électriquement chargées).
- **Les transports actifs**, notamment, la pompe $\left(\frac{Na^+}{K^+} \text{ ATPase}\right)$ qui permet le maintien de la polarisation de repos.

5.3.4.1. Répartition Des Charges Ioniques :

L'inégalité de la répartition des charges ioniques entre les deux faces de la membrane cellulaire entraîne une différence de potentiel strictement localisée à la membrane. La face interne étant toujours chargée négativement alors que la face externe chargée positivement. Le milieu extra cellulaire est surtout composé d'ions de sodium (Na^+) et de chlore (Cl^-) alors que le potassium (K^+) est surtout intra cellulaire.



5.3.4.1.1. Forces Mises En Jeux :

Il existe trois types de forces permettant le déplacement des ions (charges) à travers la membrane cellulaire.

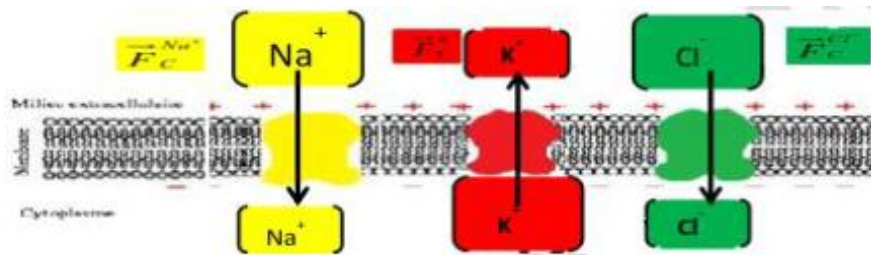
a) Différence De Concentration : (\vec{F}_{conc})

La charge électrique ou l'ion se déplace du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré.

Le sodium (Na^+) étant plus concentré dans le milieu extra cellulaire, sous l'effet de la force de concentration, il va se déplacer vers le milieu intra cellulaire.

Le chlore (Cl^-) se trouvant plus concentré à l'extérieur de la membrane cellulaire, la force de concentration le fait déplacer vers l'intérieur de la membrane cellulaire.

Alors que le potassium (K^+) plus concentré dans le milieu intra cellulaire va tendre à être déplacé vers l'extérieur de la cellule.



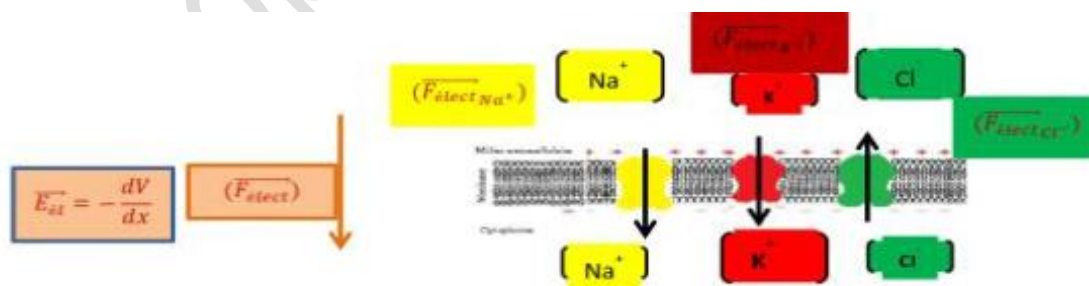
b) Différence De Potentiel : (\vec{F}_{elect})

La différence de potentiel qui existe entre les deux milieux extra et intra cellulaire génère un champ électrique. Ce champ électrique est orienté dans le sens des potentiels décroissant (au repos il est orienté vers l'intérieur de la cellule). Des forces électriques induites par ce champ tendent à faire déplacer les ions. Les cations se déplacent dans le sens du champ et les anions se déplacent dans le sens opposé. Ce qui donne :

Le sodium (Na^+) qui se trouve dans le milieu **extra cellulaire** va être **déplacé vers le milieu intra cellulaire**.

L'ion potassium (K^+) se trouvant dans le milieu **extra cellulaire** va se déplacer vers **l'intérieur de la membrane**.

Alors que l'ion (Cl^-) se trouvant à **l'intérieur** de la membrane cellulaire va se déplacer vers **l'extérieur** de la membrane cellulaire.

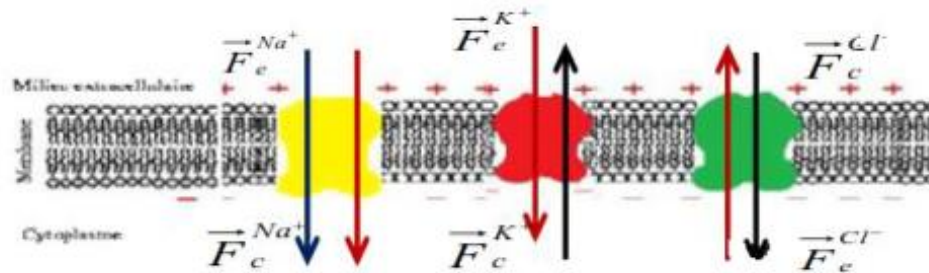


c) Différence De Pression :

La différence de pression entre deux milieux génère une force qui est à l'origine du mouvement de particules entre ces deux milieux. Bien que cette force soit **négligée dans les phénomènes d'électrophysiologie**, elle ne peut être négligé au niveau des alvéoles où se fait l'échange gazeux (oxygène, gaz carbonique), et au niveau des reins où se fait la filtration des toxines.

d) Conclusion.

En analysant uniquement les forces, le chlore et le potassium peuvent rentrer et sortir de la membrane cellulaire grâce aux deux forces citées précédemment, la force de concentration et la force électrique. L'une des forces déplace l'ion vers l'extérieur de la membrane cellulaire et l'autre le ramène vers l'intérieur de la cellule.



La situation **d'équilibre 'repos'** correspond à une situation où les forces de diffusions sont exactement **contrebalancées** par les forces électrostatiques. Un équilibre électrochimique se réalise pour les ions de **potassium** et les ions de **chlore**.

Mais pour le **sodium**, la force de **concentration** et la force **électrique** sont orientées dans le **même** sens (vers l'intérieur de la cellule) ce qui risque de déséquilibrer la répartition des charges de sodium. **Cette remarque a amené Boyle et Conway à dire que la membrane cellulaire est imperméable au sodium.**

5.3.4.2 Potentiel D'équilibre Des Charges.

Les flux des charges (K^+) et (Cl^-) sont opposés entre le milieu extra et intra cellulaire. Ces deux flux opposés s'équilibrent au repos.

5.3.4.2.1 Équation de NERNST.

NERNST montre qu'il est possible de calculer pour un ion quelconque (x), connaissant ses concentrations dans les milieux extra et intracellulaire, la différence de potentiel entre les deux faces de la membrane. Cette différence de potentiel d'équilibre théorique (appelé aussi potentiel d'équilibre) permettrait de maintenir stables dans le temps les concentrations de l'ion (x). L'équation de **NERNST** est donnée pour un ion quelconque par :

$$E_{ion} = E_{intra} - E_{extra} = \frac{R \times T}{|Z| \times F} \times \ln \left(\frac{[ion]_{intra}}{[ion]_{extra}} \right)$$

Avec : E_{ion} : la différence de potentiel de l'ion entre les deux faces de la membrane cellulaire.

E_{extra} : Le potentiel électrique du milieu extra. $[ion]_{extra}$: Concentration de l'ion extracellulaire.

E_{intra} : Le potentiel électrique du milieu intra. $[ion]_{intra}$: Concentration de l'ion intracellulaire.

R : Constante des gaz parfait ($R = 8,31 \frac{joules}{mole.K^\circ}$). T : température en degré Kelvin.

F : Constante de Faraday : $F = 96500 \left(\frac{coulomb}{moles} \right)$; Z : la valence de l'ion ($Z_{Na^+} = 1$ et $Z_{SO_4^{2-}} = -2$)

Exemple : Soit une membrane neuronale de concentration suivante :

$$[K^+]_{extra} = 4 (mMole) ; [K^+]_{intra} = 160 (mMole) ; \\ [Cl^-]_{extra} = 147 (mMole) ; [Cl^-]_{intra} = 14 (mMole) .$$

Calculer le potentiel d'équilibre du potassium et du chlore à la température de ($T = 37^\circ C$).

$$E_{ion} = E_{intra} - E_{extra} = \frac{R \times T}{Z \times F} \times \ln \left(\frac{[ion]_{intra}}{[ion]_{extra}} \right)$$

a) Potentiel D'équilibre Des Charges(K⁺).

Les flux des charges sont opposés entre le milieu extra intra cellulaire. L'égalité de ces deux flux nets correspond à l'état d'équilibre, et le déplacement des ions à travers la membrane s'arrête.

Le potentiel d'équilibre du potassium est : $E_{K^+} = -87 \text{ mV.}$

b) Potentiel D'équilibre Des Charges(Cl⁻).

Les flux des charges sont aussi opposés entre le milieu extra et intra cellulaire. Même chose pour cet élément, l'égalité des deux flux nets correspond à l'état d'équilibre, et le déplacement à travers la membrane s'arrête.

Le potentiel d'équilibre du chlore est de l'ordre de : $Cl^- = +60 \text{ mV.}$

5.3.4.3 Équilibre de DONNAN.

5.3.4.3.1 Observation.

Le phénomène 'Donnan' est le phénomène qui caractérise la répartition d'équilibre **passive** d'ions **diffusibles** de part et d'autre d'une membrane en **présence** d'une espèce ionique **non diffusible** (protéines chargées négativement). Les protéines chargées négativement génèrent **une force d'attraction coulombienne** et **empêchent les charges positives de se déplacer librement** à travers la membrane.

5.3.4.3.2 Théorie de GOLDMAN-HODGKIN.

La membrane plasmique présente une perméabilité sélective, modulable par différents facteurs. Les trois ions principaux (Na⁺), (K⁺), et (Cl⁻) sont tous trois diffusibles avec des perméabilités inégales. Celle du sodium étant la plus faible. Le modèle de **GOLDMAN-HODGKINS** donne la valeur du potentiel de membrane lorsque plus d'une substance est active au sein de la membrane. Ils modélisent la membrane plasmique par un ensemble de condensateurs et de résistances. L'équation donnant le potentiel membranaire est plus générale (compliquée) que celle de **NERNST**.

$$E_{\text{membrane}} = E_{\text{intra}} - E_{\text{extra}} = \frac{R \times T}{Z \times F} \times \ln \left(\frac{\mu_{(K)} [K^+_{\text{extra}}] + \mu_{(Na)} [Na^+_{\text{extra}}] + \mu_{(Cl)} [Cl^-_{\text{intra}}]}{\mu_{(K)} [K^+_{\text{intra}}] + \mu_{(Na)} [Na^+_{\text{intra}}] + \mu_{(Cl)} [Cl^-_{\text{extra}}]} \right)$$

μ_i : est la mobilité de l'ion(i)

5.3.4.3.3 Effet DONNAN.

À l'intérieur de la cellule, il y a des protéines chargées négativement, mais pas à l'extérieur. Lorsqu'un ion ne peut pas diffuser librement à travers la membrane celle-ci est dite semi-perméable. La distribution des autres ions est modifiée de façon prévisible.

On peut imaginer la situation suivante :

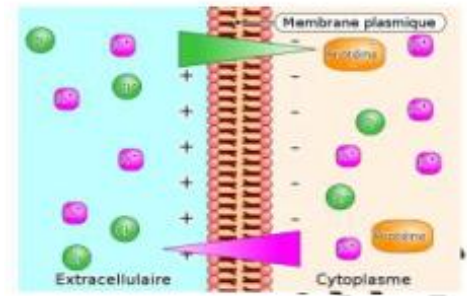
Deux milieux sont séparés par une membrane semi-perméable **laissant passer** les ions (K⁺) et les ions (Cl⁻), mais étant **imperméable** aux protéines chargées négativement à cause de leurs tailles importantes.

S'il n'y avait pas ces protéines, on peut considérer que la concentration de cations et d'anions est égale de part et d'autre de la membrane cellulaire, l'ion (Cl⁻) va diffuser vers l'intérieur de la cellule, et l'ion (K⁺) l'accompagne de manière à préserver l'électro neutralité du côté extracellulaire.

La charge **négative** des protéines (intracellulaire) **réduit** la diffusion de **cations** (K^+) et favorise celle des **anions** (Cl^-). La force **d'attraction** Coulombienne existante entre ces protéines et les charges ioniques positives **empêchent** ces derniers de traverser **librement** la membrane cellulaire.

On aura donc à l'équilibre une concentration plus élevée de (K^+) à **l'intérieur** de la cellule. Ce phénomène s'accompagne d'une répartition inégale d'ions diffusibles de part et d'autre de la membrane cellulaire, et entraîne une différence de potentiel transmembranaire.

DONNAN et GIBBS ont démontré que les ions diffusibles se distribuent de façon que les rapports de concentration soient égaux à l'équilibre.



$$\frac{[K^+]_{intra}}{[K^+]_{extra}} = \frac{[Cl^-]_{extra}}{[Cl^-]_{intra}}$$

Cette expression permet d'obtenir de **GIBBS-DONNAN** :

$$[K^+]_{intra} \times [Cl^-]_{intra} = [K^+]_{extra} \times [Cl^-]_{extra}$$

Cette équation **n'est valable** que pour toutes **les paires** de cations et d'anions de **même valence**.

L'équilibre sera réalisé quand les deux conditions suivantes sont satisfaites.

- La condition **d'électro neutralité doit être satisfaite** entre les deux milieux extra et intracellulaire.
- À l'équilibre **les flux d'ion s'annulent**.

5.3.4.4 Potentiel De Repos.

Si l'on considère que plusieurs ions sont impliqués (Na^+ , K^+ , Cl^- et Ca^{++}) le potentiel de repos (V_R) (noté aussi P_0), stable de la membrane est obtenu **lorsque la somme de tous les courants ioniques à travers la membrane est nulle.**

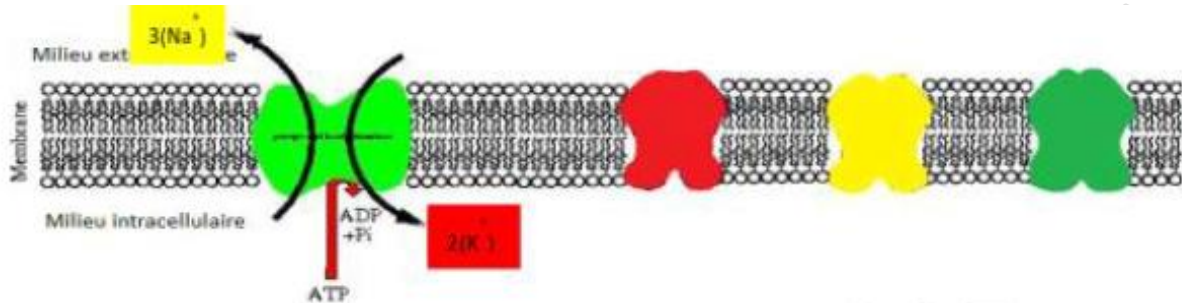
Les gradients des concentrations ioniques sont établis par l'intermédiaire de deux pompes ioniques situées dans la membrane cellulaire :

- Pompe ($\frac{Na^+}{K^+}$) **ATPase**. La pompe transporte activement, contre leurs gradients, trois ions de sodium (Na^+) du milieu intracellulaire vers le milieu extracellulaire en échange de deux ions de potassium (K^+) du milieu extracellulaire vers le milieu intracellulaire.
- Pompe (Ca^{++}) **ATPase**. La pompe calcium transporte activement les ions (Ca^{++}) en dehors du cytoplasme, à travers la membrane cellulaire.

Le potentiel de repos est compris entre $-90 \text{ (mV)} \leq P_0 \leq -40 \text{ (mV)}$. Celui de l'hématie (globule rouge) est de l'ordre de -10 (mV) .

5.3.4.4.1 Pompe $\left(\frac{\text{Na}^+}{\text{K}^+}\right)$ ATPase.

La pompe sodium-potassium est une protéine transmembranaire dont l'activité enzymatique utilise de l'énergie (**ATP**) pour transporter des ions de potassium et de sodium **contre** leur gradient de concentration. Elle joue un rôle important dans le maintien du potentiel de repos des cellules nerveuses, musculaires et cardiaques. La pompe permet d'échanger les ions sodium (Na^+) issus du milieu intracellulaire avec les ions potassium (K^+) issus du milieu extracellulaire dans un rapport précis de $\left(\frac{3 \text{ Na}^+}{2 \text{ K}^+}\right)$. Cette pompe est responsable aussi du rétablissement de l'équilibre initial après un potentiel



d'action.

Donc la pompe $\left(\frac{\text{Na}^+}{\text{K}^+}\right)$ ATPase remplit la cellule de potassium et la vide de sodium, elle mobilise à chaque fois un bilan d'une charge positive vers l'extérieur de cellule.

En plus de la pompe $\left(\frac{\text{Na}^+}{\text{K}^+}\right)$ ATPase, la force de concentration intervient et fait ressortir l'excès d'ion (K^+) vers le milieu externe en apportant de plus en plus de charges positives avec elle.

Le milieu intra cellulaire de la membrane devient chargé négativement ce qui limite la diffusion des molécules de potassium à l'extérieur.

5.3.4.5 Potentiel D'action :

5.3.4.5.1 Excitabilité D'une Cellule :

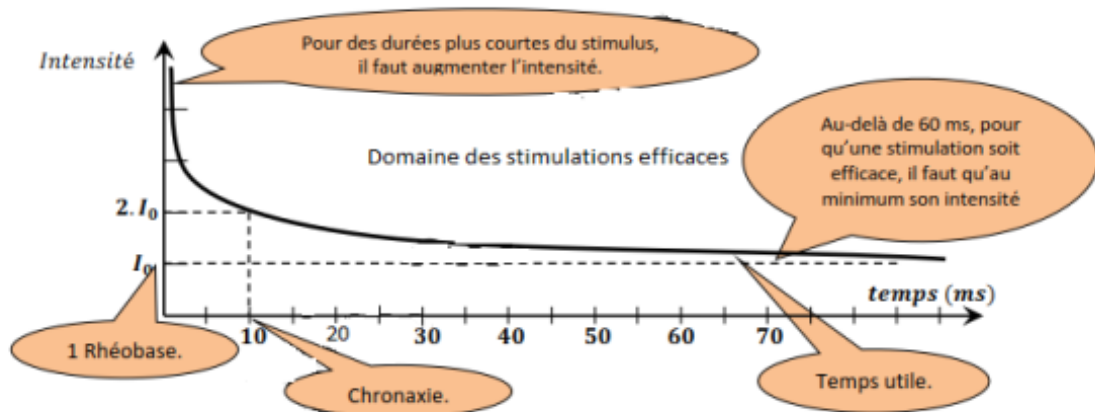
L'excitation des cellules peut se faire par le biais de nombreux excitants ; thermique, chimique, mécanique, électrique, etc...

5.3.4.5.1.1 Avantages De L'excitation Électrique :

L'excitation électrique est **mesurable, quantifiable, reproductible**, facile à délivrer. Un courant électrique peut se quantifier, en intensité (**I en ampères**) et en durée (**t en secondes**). La quantité d'électricité **Q** délivrée (**en coulombs**) est fonction de deux paramètres. La **Rhéobase** et la **Chronaxie**.

5.3.4.5.1.2 Expérience Historique De Lapicque :

LAPICQUE étudie l'excitabilité d'un nerf (**population d'axones**) et établit une courbe (**intensité/durée**), pour des excitations dont la durée est supérieure à **60 ms**. Il a remarqué qu'il faut une intensité minimale pour obtenir une réponse à l'excitation, et il appelle cette intensité la **Rhéobase**, la courbe suivante permet d'explicitier cette **Rhéobase**.



Ainsi l'efficacité d'un courant électrique sur un nerf ne dépend pas seulement de son intensité, mais aussi de la durée pendant laquelle il est appliqué. **LAPICQUE** définit aussi l'intensité qui correspond à deux fois la valeur de la **Rhéobase** par la **Chronaxie**.

5.3.4.5.1.3 Action D'un Courant Électrique Sur Une Membrane :

Il s'agit de comprendre la transition entre l'état de repos et l'état d'activité (**Potentiel d'action**).

Comme le montre l'expérience de **LAPICQUE**, seuls les courants électriques d'intensité égale ou supérieure à une **rhéobase** font apparaître un potentiel d'action.

Les courants d'intensité moindre ne produisent pas de potentiel d'action. Ils déclenchent de petites variations de potentiel dont les caractéristiques révèlent les propriétés de la membrane.

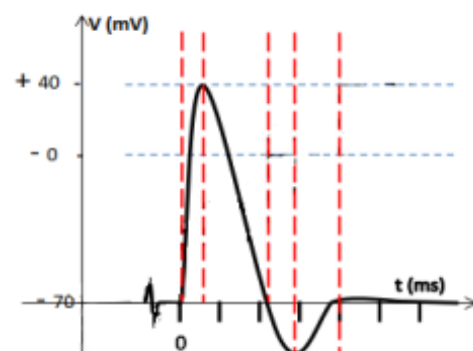
5.3.4.5.2 Description Du Potentiel D'action:

Si l'on stimule la membrane cellulaire avec une excitation externe mécanique ou électrique, on aboutit à la courbe suivante.

L'amplitude et la durée du potentiel d'action sont indépendantes de la durée et de l'intensité de l'excitation. Elles dépendent de la nature du tissu et de l'espèce.

On distingue deux situations différentes :

- Soit l'intensité de la stimulation est insuffisante pour atteindre le seuil critique (**infraliminaire**) et le potentiel d'action n'apparaît pas.
 - Soit l'intensité de stimulation est suffisante pour atteindre le seuil critique (**supraliminaire**) le potentiel d'action est immédiatement maximal.
- On dit que la fibre **obéit** à la loi du **tout ou rien**.



Sur le graphe, l'axe des abscisses représente le temps en millisecondes (**ms**) et l'axe des ordonnées la différence de potentiel (**V**) en millivolts (**mV**).

On distingue **quatre phases différentes**.

- a) **1^{ère} phase** : Dans cette phase, l'excitation externe a provoqué une augmentation du potentiel, il s'annule puis se positive. Cette phase est dite la phase de (**dépolarisation rapide**), extrêmement brève puisqu'elle ne dure qu'une fraction de milliseconde et qui se traduit par une **brusque inversion** du potentiel de membrane. On passe en moyenne d'une valeur de -70 mV à une valeur de $+40\text{ mV}$. L'excitation a provoqué une inversion de la différence du potentiel électrique. L'intérieur de la cellule devient chargé positivement et l'extérieur devient négatif.
- b) **2^{ème} phase** : Elle représente la phase de la repolarisation rapide plus lente que la précédente et qui permet au potentiel de membrane de revenir à son niveau de repos.
- c) **3^{ème} phase** : C'est une phase d'hyperpolarisation, Plus lente que la précédente (plusieurs millisecondes). La courbe continue à descendre.
- d) **4^{ème} phase** : C'est une phase de repolarisation lente qui permet à la cellule de revenir à sa normale si l'excitation n'est pas poursuivie. C'est à dire une polarité positive à l'extérieure et négative à l'intérieur de la membrane cellulaire.

Ce sont les mouvements de sodium et de potassium qui sont à l'origine des différentes phases du potentiel d'action.

5.3.4.5.3 Origine De La Dépolarisation Rapide (1^{ère} phase) :

Il existe dans la membrane cellulaire, en plus des canaux passifs, des **canaux actifs voltage dépendant**. Ces canaux actifs ne s'ouvrent que si l'excitation est supraliminaires.

Au repos, la **perméabilité membranaire au sodium (P_{Na})** est **très faible** car la plupart des canaux sodium voltage dépendant **sont fermés**, une légère excitation suffit à provoquer leurs ouvertures. Ces canaux sodium étant ouverts, **les deux forces** citées précédemment (la force de concentration et la force électrique) **s'activent** pour faire rentrer massivement les ions sodium dans la cellule, ce qui augmente la dépolarisation et finit par inverser le potentiel membranaire et qui peut atteindre une valeur d'environ $(+40\text{ mV})$. Le milieu **intra** cellulaire devient **chargé positivement** et le milieu **extra** cellulaire **négativement**.

5.3.4.5.4 Origine De La Repolarisation (2^{ème} Phase) :

Lorsque la pointe (**Spike**) est atteinte, les canaux sodium voltage dépendant se ferment, cette fermeture induit l'ouverture de canaux potassium, également électro dépendants. Ce qui a pour effet d'augmenter la perméabilité au potassium (P_K). Les ions potassium, beaucoup plus nombreux à l'intérieur qu'à l'extérieur de la cellule et sous l'effet des deux forces précédentes, quittent alors la cellule en masse et permettent au potentiel de membrane de retrouver sa valeur initiale.

5.3.4.5.5 Origine De L'hyperpolarisation (3^{ème} Phase) :

Dans cette phase le potassium continue de sortir du milieu intra cellulaire. En effet les canaux potassium voltage dépendant se ferment lentement (subissant un léger retard) par rapport aux canaux sodium voltage dépendant. Ce qui fait que la différence de potentiel entre le milieu extra et intra cellulaire continue de diminuer et devient inférieur au potentiel de repos initial.

5.3.4.5.6 Origine Du Retour À La Normale (4eme Phase):

Dans cette phase la pompe $\left(\frac{\text{Na}^+}{\text{K}^+}\right)$ ATPase s'active en utilisant de l'énergie métabolique pour faire sortir l'excès de sodium du milieu intracellulaire et faire rentrer le potassium dans le milieu intracellulaire.

5.3.4.5.7 Remarque :

- Si l'on **restimule** la membrane cellulaire, cette seconde excitation ne pourrait pas **réenclencher** un deuxième potentiel d'action. La membrane étant dépolarisée, il faut attendre un certain temps avant que celle-ci puisse de nouveau subir une dépolarisation. Cette absence d'excitabilité est due au grand nombre de canaux sodium encore inactivés. Cette durée est dite **période réfractaire absolue**, elle permet au signal de se déplacer dans un seul sens.
- La troisième phase est dite période **réfractaire relative**, c'est la période qui se produit juste après la période absolue. Un intervalle de temps (**1 à 15 ms**) durant lequel un stimulus ne **déclencherait** plus un potentiel d'action sauf si celui-ci est supérieur à la normale.
- Dans le cas de la cellule nerveuse la phase de repolarisation **débute immédiatement** après la phase de dépolarisation, alors que dans le cas de la **cellule cardiaque** on retrouve un **palier** avant le début de la repolarisation.
- Pendant la quatrième phase la cellule est **normale**, elle devient excitable, elle répond immédiatement à toute autre stimulation.
- La **durée** d'un cycle d'activation est de l'ordre de **58 millisecondes**.

5.3.4.6 Propagation Du Potentiel D'action :

Après d'une excitation **supraliminaire**, un potentiel d'action se forme, les canaux **sodique voltage dépendant s'activent**, d'autres canaux qui se trouvent à proximité de l'excitation s'activent aussi pour faire **propager** l'excitation. Ce phénomène de **vague de dépolarisation/repolarisation** continu jusqu'à ce que le signal de dépolarisation membranaire traverse tout l'axone.

On appelle cette vague de potentiel d'action **l'influx nerveux**. Sur une seule fibre nerveuse, **l'amplitude** du potentiel d'action ne varie pas. Mais la vitesse de propagation de l'influx nerveux varie d'une fibre à une autre.

Si la fibre est **myélinisée** le signal se propage plus vite, il se fait de manière **saltatoire** entre deux nœuds **de Ranvier**. Cette vitesse de propagation **augmente** en fonction du **diamètre** de la fibre.

La période réfractaire des canaux sodique voltage dépendant ne permet pas au signal de faire marche arrière. **Le signal se propage toujours dans un seul sens.**

5.4 Signaux Électriques Et Débit Sanguin :

5.4.1 Anatomie et fonctionnement du cœur :

Le cœur est une pompe, dont le rôle principal est de propulser le sang à travers un système de vaisseaux, les artères et les veines. On distingue deux types de circulation, la petite circulation et la grande.

5.4.1.1 La Petite Circulation Ou Circulation Pulmonaire :

On retrouve dans la petite circulation :

- **L'oreillette Droite et le Ventricule Droits** appelé aussi le « **Cœur Droit** ».
- **Aorte Pulmonaire.**
- **Les Capillaires Pulmonaires.**
- **L'artère pulmonaire, les poumons, et les veines pulmonaires** qui permettent de ré envoyer le sang dans le cœur gauche.

La petite circulation, est une partie de l'appareil cardio-vasculaire dont la fonction est d'amener par l'artère pulmonaire le sang veineux (sang pauvre en oxygène et riche en gaz carbonique) au contact des alvéoles pulmonaires pour le ré oxygéner totalement puis de le renvoyer par la veine pulmonaire au niveau du cœur gauche.

5.4.1.2 La Grande Circulation :

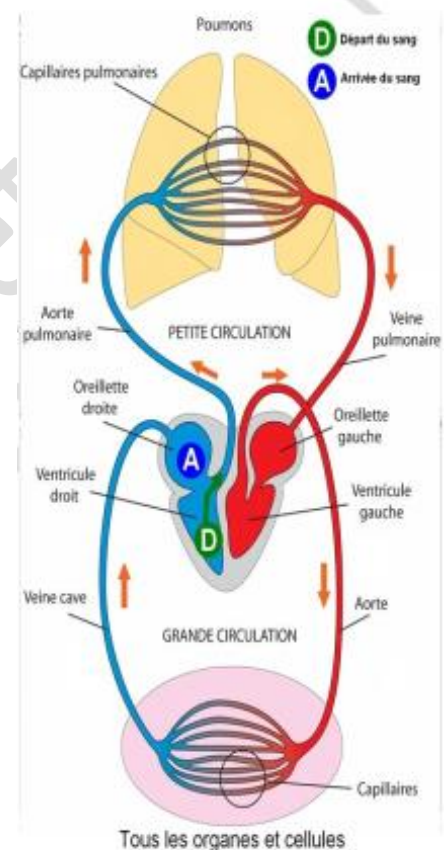
Cette circulation permet **d'irriguer** le corps en matière **nutritives** et en **oxygène**, elle comprend :

- **Le cœur « Gauche »** composé du **Ventricule Gauche** et de l'**Oreillette Gauche**.
- **L'aorte** : est la principale artère sortante du ventricule gauche.
- **Les Capillaires des différents organes.**
- **La Veine Cave Supérieure et Inférieure** qui permettent de cheminer le sang vers le cœur droit.

La grande circulation, appelée aussi circulation systémique, est une partie de l'appareil cardio-vasculaire dont la fonction est d'amener le sang oxygéné (riche en oxygène et en matières nutritives) qui part du cœur gauche à tous les organes du corps par le biais de l'aorte puis de cheminer ce sang veineux au cœur droit par les veines caves.

Le système circulatoire (cœur et vaisseaux) passe par deux phases :

La **Diastole** (relâchement du cœur) : l'oreillette gauche reçoit du sang des veines pulmonaires et l'oreillette droite reçoit le sang des deux veines caves (supérieures et inférieures). Les oreillettes se remplissent ainsi de sang oxygéné, et riche en (CO₂) respectivement.



Systole (contraction) : Quand les oreillettes se contractent, le sang est chassé dans les ventricules. Une fois les ventricules remplis, ils éjectent le sang dans l'aorte (à gauche) et le tronc pulmonaire (à droite).

Remarque : la contraction ventriculaire est **plus rigoureuse** que celle des **oreillettes** et engendre une **grande pression**. Les **valves cardiaques**, un **système anti-reflux**, empêchent le retour du sang en arrière une fois propulsé vers les ventricules ou en dehors du cœur.

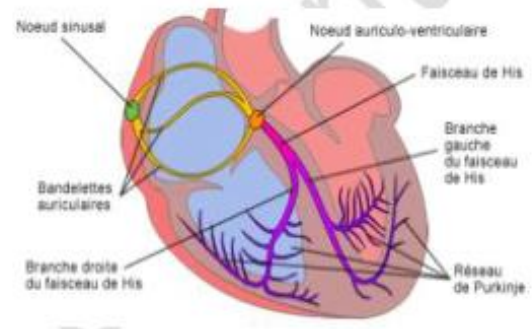
On comprend ainsi que toute **atteinte** de l'un de ces éléments va **gravement** perturber la circulation normale.

5.4.2 Tissus Cardiaque :

Les trois tissus principaux que l'on retrouve dans la pompe cardiaque sont :

5.4.5.1 Le Tissu Nodal. Il est composé de :

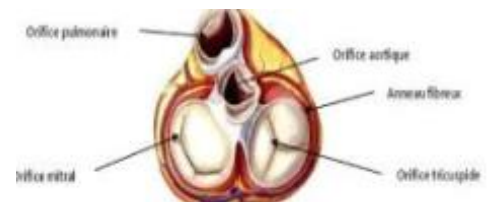
- Le **nœud sinusal** (**pacemaker naturel**)
- Les **bandelettes auriculaires**.
- Le **nœud auriculo-ventriculaire**.
- Le **faisceau de HIS**.
- Et le **réseau de (PURKINJE)**.



Le rôle principal du **tissu nodal** est l'**élaboration** et la **conduction** de l'influx nerveux.

5.4.5.2 Le Tissu Myocardique : le muscle cardiaque, dont la fonction principale est la contraction. Il permet de faire augmenter la pression dans le fluide et le faire chasser du cœur.

5.4.5.3 Un Tissu Fibreux (Anneau) : dont le rôle principal est l'isolation électrique entre les oreillettes et les ventricules. Il assure également une certaine rigidité aux valves cardiaques grâce à ses prolongements.



5.4.3 Propriétés Des Cellules Cardiaques :

Les cellules cardiaques sont caractérisées par quatre propriétés très importantes :

- **L'excitabilité.**
- **La conduction.**
- **L'automatisme.**
- **La contractilité.**

L'**excitabilité**, et la **contractilité** sont des propriétés communes avec les cellules musculaires. Alors que l'**excitabilité** et la **conduction** sont communes avec les cellules nerveuses.

L'**automatisme** est une propriété **propre** aux cellules **cardiaques du Tissu Nodal**.

5.4.6 Chemin Suivi Par L'influx :

Le signal électrique :

- **Naît** au niveau du nœud sinusal.
- Il est **conduit** à travers les oreillettes, par les bandelettes auriculaires, dans tout le tissu myocardique des oreillettes (contraction des oreillettes).
- Il passe au niveau du nœud **auriculo-ventriculaire (atrio-ventriculaire)** situé à la base des oreillettes ou il **subit un retard de 0,15 secondes** pour **séparer** entre les contractions des oreillettes et des ventricules.
- Il passe à travers le faisceau de **HIS** et empreinte ces deux **branches** droite et gauche.
- Il est rapidement **conduit** dans les cellules myocardiques ventriculaires par le réseau de **PURKINJE** (contraction des ventricules).

5.4.7 L'électrocardiographe (ECG).

5.4.7.1 Généralités.

Le cœur est le siège de phénomènes électriques lors de son activation. Il peut être considéré comme une source électrique dont on peut mesurer ses effets sous forme de signal électrique.

5.4.7.2 Comparaison Entre Les Potentiels D'actions Des Cellules Cardiaques :

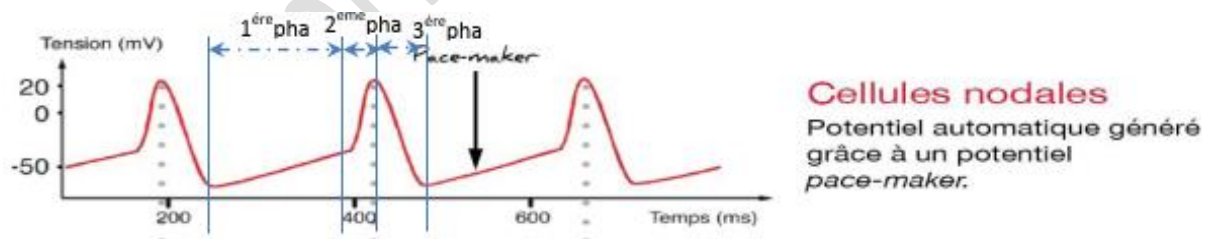
Il faut noter que le potentiel de repos existe dans toutes les cellules vivantes, en raison de la différence de concentrations ioniques entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule, la différence principale est la grandeur de ce potentiel d'action. Celle-ci est variable selon la fonction de la cellule, et sa valeur varie de **-40 mv** à **-90 mv**.

Le fonctionnement de la cellule joue un rôle crucial, pour ce qui est du potentiel d'action.

5.4.7.2.1 Le Potentiel D'action De La Cellule Du Tissu Nodal :

Cellule dite **automatique** c'est-à-dire que son potentiel d'action ne nécessite pas un stimulus supraliminaire. Il existe des particularités au niveau des canaux ioniques de ce type de cellule leur permettant un cycle régulier de dépolarisation et repolarisation (Pacemaker) sans intervention externe.

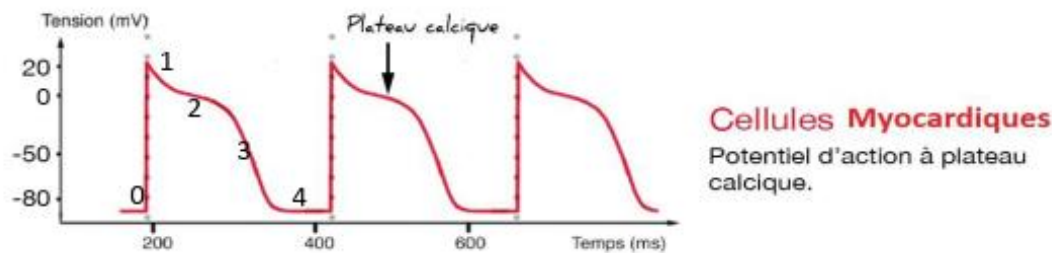
On trouve **trois phases** distinctes dans le potentiel d'action de la cellule nodale :



- La **première phase** est la conséquence de l'entrée de (Na^+) qui perturbe le potentiel de membrane en le rapprochant de la **zone seuil d'excitabilité**.
- Une fois le **seuil d'excitabilité** atteint, **les canaux calcium (Ca^{++}) permettent une entrée massive de Calcium** responsable de la deuxième phase ascendante du potentiel d'action du tissu nodal (**plutôt que celle du (Na^+)** observé dans d'autre type de cellule).
- La repolarisation, **troisième phase**, est due à **l'ouverture des canaux (K^+)** provoquant ainsi une sortie du potassium et le retour au potentiel de membrane initial avant le début d'une autre dépolarisation.

5.4.7.2.2 Le Potentiel D'action De La cellule Myocardique :

Le myocarde comme la cellule nerveuse nécessite un stimulus pour engendrer son potentiel d'action.



Différents étapes (phases) sont observées dans le potentiel d'action de la cellule myocardique :

- a) (0) Ouverture des canaux (Na^+), entrée massive du sodium.
- b) (1) Fermeture des canaux (Na^+) et ouverture des canaux (Ca^{++}).
- c) (2) Entrée de (Ca^{++}) La repolarisation est ralentie par la composante lente du courant calcique entrant.
- d) (3) Sortie de (K^+),
- e) (4) Pompe $\left(\frac{\text{Na}^+}{\text{K}^+}\right)$ s'active.

5.4.7.3 Dérivations :

Deux types de dérivations (capteurs électriques) sont utilisés pour recueillir le signal émis par le cœur. Le cœur étant considéré comme une source électrique.

5.4.7.3.2 Dérivations Des Membres (Frontales) :

Trois électrodes (capteurs) sont placées, l'une sur la main gauche, l'autre sur la main droite et la troisième sur l'un des pieds (par convention le pied gauche), celle que l'on place sur le pied droit est neutre.

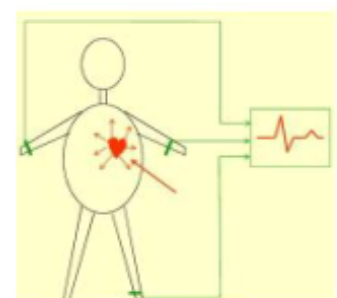
Ces dérivations permettent de mesurer les potentiels générés par l'activité électriques du cœur.

- (VR) Mesure du potentiel électrique sur la main droite (R = Right).
- (VL) Mesure du potentiel sur la main gauche (L = Left).
- (VF) Mesure du potentiel faite sur le pied (F = Foot).

Ces dérivations sont **unipolaires** et permettent de mesurer une seule valeur de potentiel électrique.

Trois autres dérivations, dites **bipolaires**, sont **déduites** des précédentes (D_1 , D_2 , et D_3). Elles représentent les différences de potentiel entre les mesures précédentes.

- ($D_1 = \text{VR} - \text{VL}$), est la différence de potentiel entre la mesure de la main droite et celle de la main gauche.
- ($D_2 = \text{VR} - \text{VF}$), est la différence de potentiel entre la mesure de la main droite et celle du pied.
- ($D_3 = \text{VL} - \text{VF}$), est la différence de potentiel entre la mesure de la main gauche et celle du pied.



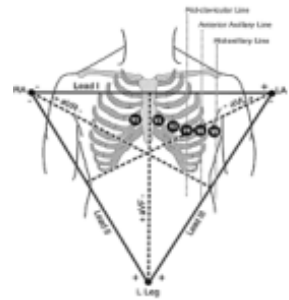
Ces six dérivations (**VR, VL, VF, D_1 , D_2 et D_3**) permettent d'explorer le cœur dans un plan frontal. Elles permettent un enregistrement à grande distance du cœur. L'activité électrique du cœur peut être assimilée à celle d'un dipôle électrique car la distance séparant la mesure de la source électrique est très grande.

5.4.7.3.3 Dérivations Précordiales (Horizontales) :

Six autres dérivations **unipolaires** (**V₁, V₂, V₃, V₄, V₅ et V₆**) sont placées en des endroits bien définis sur le thorax. Ces capteurs mesurent le potentiel électrique de l'activité du cœur.

Ces dérivations permettent d'explorer le cœur dans un plan horizontal. Le cœur est considéré comme un feuillet électrique dans ce cas, car les distances qui séparent ces mesures du cœur sont faibles.

Les dérivations **des membres et les dérivations précordiales** (douze mesures) permettent d'avoir une idée tridimensionnelle de l'activité électrique du cœur.



5.4.7.3.4 Théorie d'EINTHOVEN :

Pour expliquer facilement les tracés observés d'un électrocardiogramme ((E.C.G), **EINTHOVEN** fait trois suppositions.

- En voie d'activation ou de restauration, le cœur peut être assimilé à un dipôle électrique.
- Le centre du vecteur moment de ce dipôle peut être considéré fixe (cœur), centre du triangle.
- Les dérivations R, L et F sont supposées être sur les sommets d'un triangle équilatéral.

5.4.7.4 Lecture d'un ECG.

5.4.7.4.2 Terminologie Et Normes.

Sur un tracé d'électrocardiographie, le premier repère est la **ligne isoélectrique**. Cette ligne de base correspond à l'absence de l'activité électrique. Au-dessus de celle-ci l'onde est positive et au-dessous l'onde est négative. Une onde peut être diphasique si une partie est positive l'autre est négative.

5.4.7.4.3 L'onde P :

Est une petite onde qui représente la dépolarisation des oreillettes qui se propage du nœud sinusal à l'ensemble des cellules des oreillettes, une fois les oreillettes sont dépolarisées elles se contractent, c'est la systole auriculaire.

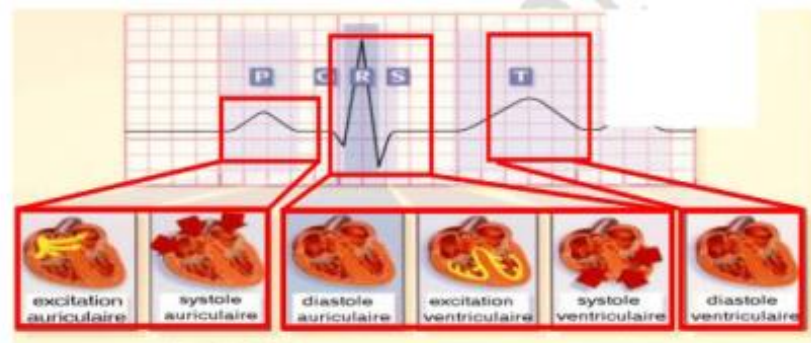
5.4.7.4.4 Le Complexe QRS :

Il commence par une déflexion vers le bas (onde Q), suivi d'une grande onde triangulaire vers le haut (onde R) et se termine par une onde descendante (onde S). Ce complexe représente la dépolarisation des ventricules. Tout comme les oreillettes, une fois toutes les cellules des ventricules sont dépolarisées elles se contractent. On parle alors de systole ventriculaire.

Remarque : l'activité électrique provoquée par la diastole auriculaire (relâchement des oreillettes) et négligeable devant l'activité électrique de la systole ventriculaire (complexe QRS), elle ne peut être enregistrée sur un électrocardiogramme de surface.

5.4.7.4.5 L'onde T :

C'est la troisième onde, elle forme une déflexion vers le haut. Elle représente la repolarisation des ventricules. Peu après le début de cette onde les ventricules se relâchent. On parle alors de la diastole ventriculaire.



En réalité l'ECG représente la somme les potentiels d'action de toutes les cellules électriques du cœur enregistré sur la surface de la peau.

