

RESUME DU CHAPITRE 1 ELECTRICITE ET PHENOMENES BIOELECTRIQUES

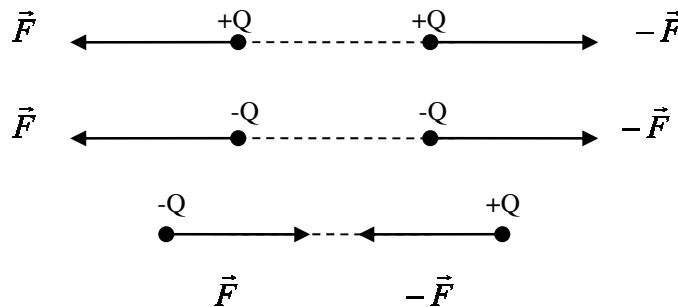
1- La loi de Coulomb.

Deux charges électriques ponctuelles dans le vide, placées à une distance r l'une de l'autre, sont soumises à une force \vec{F} dont le module est donné par la loi de Coulomb :

$$F = k \times \frac{|q \times q'|}{r^2} \quad \text{où} \quad k = 9 \times 10^9 \text{ SI}$$

La constante k dépend du milieu où les charges sont placées.

Cette force est répulsive si les deux charges sont de mêmes signes. Elle est attractive si elles sont de signes contraires.



2- Le champ électrique.

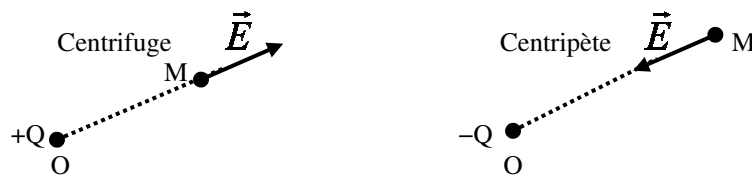
Chaque charge électrique ponctuelle q crée, en un point distant de r de celle-ci, un champ électrique \vec{E} dont le module est donnée par :

$$E = k \times \frac{|q|}{r^2}$$

L'unité du champ électrique est le Newton sur Coulomb (N/C) ou le Volt sur mètre (V/m).

Une charge électrique positive, placée au point O, crée au point M un champ électrique \vec{E} parallèle à \vec{OM} .

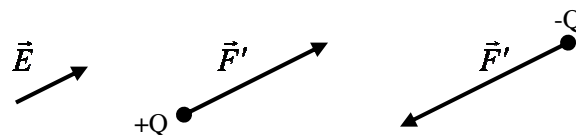
Une charge électrique négative, placée au point O, crée au point M un champ électrique \vec{E} antiparallèle à \vec{OM} .



Une autre charge électrique q' placée dans ce champ électrique \vec{E} sera soumise à une force \vec{F}' donnée par :

$$\vec{F}' = q' \times \vec{E}$$

Si la charge q' est positive, \vec{F}' est parallèle à \vec{E} . Si la charge q' est négative, \vec{F}' est antiparallèle à \vec{E} .



Dans le cas où plusieurs charges $q_1, q_2, q_3 \dots$ créent en un point M plusieurs champs électriques $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$... Le champs électrique total \vec{E}_M au point M est donnée par :

$$\vec{E}_M = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$$

3- Le potentiel électrique :

Toute charge q crée en tout point M, distant de r de la charge, un potentiel électrique V donné par la relation :

$$V = k \times \frac{q}{r}$$

L'unité du potentiel électrique est le Volt (V). Le potentiel électrique peut être positif ou négatif selon le signe de la charge.

Une autre charge électrique q' placée dans ce potentiel électrique V aura une énergie potentiel E'_p donnée par :

$$E'_p = q' \times V$$

Dans le cas où plusieurs charges $q_1, q_2, q_3 \dots$ créent en un point M plusieurs potentiels électriques $V_1, V_2, V_3 \dots$ Le potentiel électrique total V_M au point M est donnée par :

$$V_M = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

Lorsqu'une charge q se déplace d'un point A, où le potentiel électrique est V_A , vers un point B, où le potentiel électrique est V_B , le travail de la force électrostatique est :

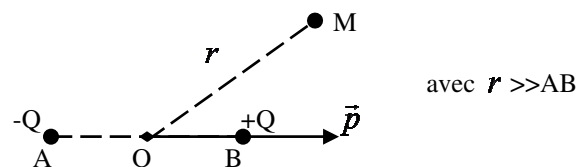
$$W_{A \rightarrow B} = q \times (V_A - V_B)$$

Si ce travail est positif, il est dit moteur. S'il est négatif il est dit résistant.

4- Le dipôle électrique.

Un dipôle électrique est l'ensemble de deux charges électriques ($-q$) et ($+q$) placées aux points A et B.

L'approximation dipolaire est que les distances r au centre du dipôle O, auxquelles on se place, sont très grandes devant les dimensions AB du dipôle.



Le moment dipolaire électrique \vec{p} qui caractérise un dipôle est donné par :

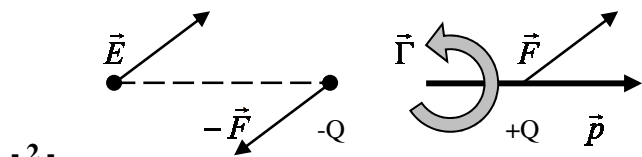
$$\vec{p} = q \times \overline{AB}$$

Le moment dipolaire électrique \vec{p} est un vecteur dirigé du (-) au (+).

L'unité du moment dipolaire est le Coulomb par mètre (C.m) ou le Debye (D), tel que : $1 \text{ D} = \frac{1}{3} \times 10^{-29} \text{ C.m}$.

Lorsque l'on place un dipôle électrique de moment \vec{p} dans un champs électrique uniforme \vec{E} , le dipôle sera soumis à un couple de rotation $\vec{\Gamma}$ qui tend à aligner les deux vecteurs \vec{p} et \vec{E} . Le module du couple de rotation est donné par :

$$\Gamma = p \times E \times \sin(\vec{p}, \vec{E})$$



5- Le courant électrique :

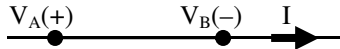
Le courant électrique est un écoulement de charges électriques d'un point à un autre. L'intensité du courant électrique I est donnée par :

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Où dq est la quantité de charge qui traverse une section droite pendant le temps dt . L'unité de l'intensité du courant électrique est l'ampère (A).

6- La loi d'Ohm :

Pour qu'il y ait un courant électrique entre deux points A et B, il faut que la différence de potentiel entre ces deux points soit non nulle. L'intensité du courant électrique est proportionnelle à la différence de potentiel. Cette relation est donnée par la loi d'Ohm :

$$V = V_A - V_B = R \times I$$


Où R est la résistance du conducteur. Son unité est l'ohm (Ω). V est la différence de potentiel (ddp) entre les deux points A et B. Le courant électrique s'écoule du potentiel positif (+) vers potentiel négatif (-).

Pour un conducteur de longueur l (m), de section S (m^2) et de résistivité ρ ($\Omega.m$), la résistance est donnée par la relation :

$$R = \rho \times \frac{l}{S}$$

Au borne d'un conducteur, de résistance R , ayant une différence de potentiel V et parcouru par un courant I , il se dissipe pendant le temps t une énergie W , tel que :

$$W = V \times I \times t = R \times I^2 \times t = \frac{V^2}{R} \times t$$

L'énergie dissipée s'exprime en Joules (J). La puissance dissipée dans le conducteur est donnée par :

$$P = \frac{W}{t} = V \times I = R \times I^2 = \frac{V^2}{R}$$

La puissance s'exprime en Watt (W).

On définit la densité de courant \vec{j} traversant une surface S d'un conducteur parcouru par un courant I par :

$$j = \frac{I}{S}$$

\vec{j} s'exprime en ($A.m^2$). C'est un vecteur qui donne le sens du courant électrique dans le conducteur.

Dans un conducteur ayant une densité de porteur de charge n (charge. m^{-3}), une vitesse de déplacement de ces porteurs \vec{v} , la densité de courant est donnée par :

$$\vec{j} = n \times q \times \vec{v}$$

Où q est la charge de ces porteurs. \vec{j} a le même sens que \vec{v} , si la charge est positive. \vec{j} a le sens contraire de \vec{v} , si la charge est négative.

Il existe une relation qui relie le vecteur densité de courant \vec{j} et le champ électrique \vec{E} à l'intérieur du conducteur.

$$\vec{j} = \sigma \times \vec{E} \quad \text{avec } \sigma = \frac{1}{\rho}$$

Où σ est la conductivité, inverse de la résistivité. C'est la loi d'Ohm microscopique.

On définit la mobilité μ d'un porteur de charge ayant une vitesse \vec{v} dans un champ électrique \vec{E} par :

$$\vec{v} = \mu \times \vec{E}$$

La mobilité est une grandeur algébrique. Elle est positive pour une charge positive et négative pour une charge négative. Elle s'exprime en $(m^2 \cdot s^{-1} \cdot V^{-1})$.

7- Circuits électrique et lois de Kirchhoff :

Résistances en série : La résistance équivalente R_{eq} de n résistance R_1, R_2, \dots, R_n , placées en série est :

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Résistances en parallèle : La résistance équivalente R_{eq} de n résistance R_1, R_2, \dots, R_n , placées en parallèles est :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Générateurs en série : Le générateur (E_{eq}, R_{eq}) équivalent à n générateurs identiques, de force électromotrice (fem) E et de résistance interne R , placés en série, est tel que :

$$E_{eq} = n \times E$$

$$R_{eq} = n \times R$$

Générateurs en parallèle : Le générateur (E_{eq}, R_{eq}) équivalent à n générateurs identiques, de force électromotrice (fem) E et de résistance interne R , placés en parallèles, est tel que :

$$E_{eq} = E$$

$$R_{eq} = \frac{R}{n}$$

Lois de Kirchhoff :

Il y a deux lois : la loi des nœuds et la loi des mailles.

Pour un nœud donné, où entrent n courants et d'où sortent m courants, la loi des nœuds donne :

$$\sum_{i=1}^n I_i^{Entrant} = \sum_{i=1}^m I_i^{Sortant}$$

Pour une maille donnée, ayant n générateurs et m résistances parcourues par m courant la loi des mailles donne :

$$\sum_{i=1}^n E_i + \sum_{i=1}^m R_i \times I_i = 0$$

En pratique et pour un circuit donné, il faut suivre les étapes suivantes :

1. Le nombre de mailles indépendantes n est égal au nombre d'inconnues qui sont en général les courants.
2. Placer les n courants dans chaque branche, en appliquant la loi des nœuds directement à chaque nœud.
3. Choisir un sens positif de parcours.
4. Appliquer la loi des mailles à chaque maille, en utilisant ces conventions :
 - Je compte $+E$, si le sens positif choisit entre par la borne (+) du générateur.
 - Je compte $-E$, si le sens positif choisit entre par la borne (-) du générateur.
 - Je compte $+R \times I$, si le sens positif choisit est le même que le sens du courant I traversant la résistance.
 - Je compte $-R \times I$, si le sens positif choisit est contraire au sens du courant I .
5. On résout les n équations et on détermine les n inconnues.
6. Si un des courants calculé est négatif, on garde sa valeur mais on inverse son sens.

8- Condensateurs, Charge et décharge :

Un condensateur est un système qui emmagasine de l'énergie sous forme d'un champ électrique. Il est constitué par deux plaques conductrices séparées par un milieu isolant.

La différence de potentiel V aux bornes d'un condensateur est directement proportionnelle à la charge Q située sur l'une ou l'autre des plaques. La constante de proportionnalité est appelée *la capacité* C du condensateur.

$$Q = C \times V$$

La capacité s'exprime en Farad (F).

Condensateurs en série : Le condensateur C_{eq} équivalent à n condensateurs C_1, C_2, \dots, C_n placés en série, est donnée par :

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Condensateurs en parallèle : Le condensateur C_{eq} équivalent à n condensateurs C_1, C_2, \dots, C_n placés en parallèles, est donnée par :

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Charge d'un condensateur :

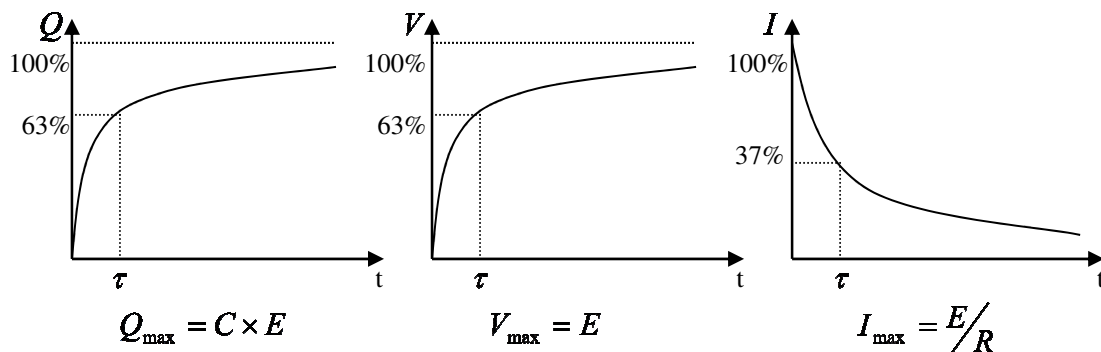
Un condensateur de charge nul placé au borne d'un générateur de force électromotrice E et de résistance interne R , voit sa charge augmenter au cours du temps. La charge Q du condensateur, la différence de potentiel V aux bornes du condensateur et le courant I dans le circuit sont donnés par les lois suivantes :

$$Q = C \times E \times \left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

$$V = E \times \left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

$$I = \frac{E}{R} \times e^{-t/RC}$$

La constante $\tau = RC$ a la dimension d'un temps. Elle est appelé la constante de temps RC ou τ . Si $t = \tau$, la charge et la tension sont à 63% de la valeur maximale. Pour le courant sa valeur chute à 37% de sa valeur initiale.



Décharge d'un condensateur :

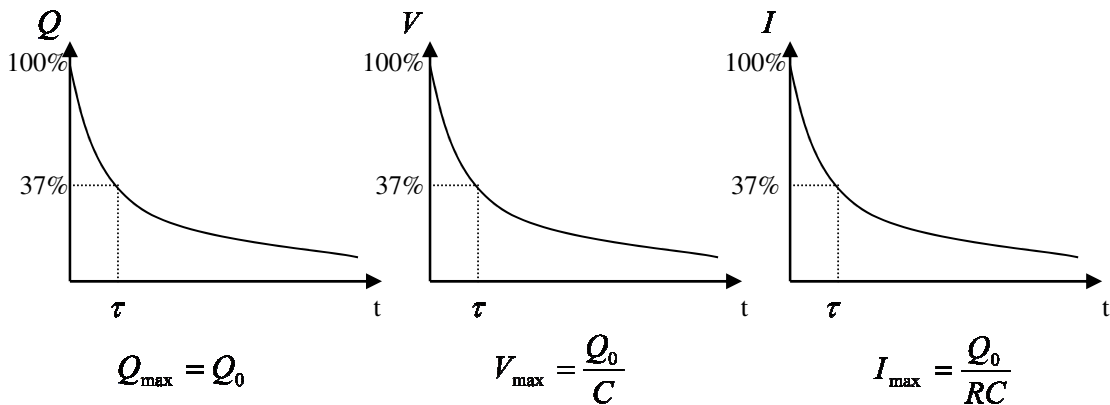
Un condensateur de charge initiale Q_0 se décharge dans une résistance R . La charge Q du condensateur, la différence de potentiel V aux bornes du condensateur et le courant I dans le circuit sont donnés par les lois suivantes :

$$Q = Q_0 \times e^{-t/RC}$$

$$V = \frac{Q_0}{C} \times e^{-t/RC}$$

$$I = \frac{Q_0}{RC} \times e^{-t/RC}$$

Si $t = \tau$, la charge, la tension et le courant chute à 37% de leur valeur initiale.



9- Bioélectricité membranaire et cellulaire :

Il n'existe pas de réaction biochimique dans une cellule qui ne soit catalysée par des enzymes. Ces enzymes interagissent avec les petites molécules par l'intermédiaire de force de faible énergie qui sont de nature électrostatique : interaction ion-dipole ou dipole-dipole. Ces mêmes types de forces interviennent dans la reconnaissance d'un médicament par son récepteur spécifique. Ces forces assurent l'échange des informations entre cellules par des transports d'ions Na^+ , K^+ , Cl^- ou de protéine à travers les membranes cellulaires. Le corps humain est le siège d'une importante activité électrique : activité cardiaque, cérébrale ou musculaire. Nous nous intéresserons essentiellement à la cellule nerveuse ou neurone et spécialement à la fibre nerveuse ou axone.

10- Fibre nerveuse au repos :

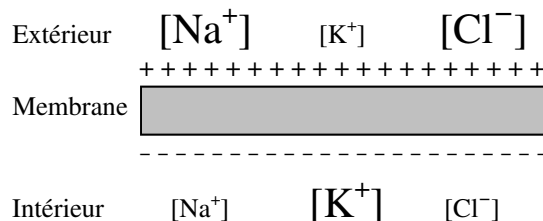
Parmi les nombreux ions des milieux biologiques, trois jouent un rôle essentiel. Il s'agit de deux cation Na^+ et K^+ , et d'un anion Cl^- .

Le milieu extracellulaire est riche en Na^+ et en Cl^- . Il est pauvre en K^+ .

Le milieu intracellulaire est riche en K^+ . Il est pauvre en Na^+ et en Cl^- .

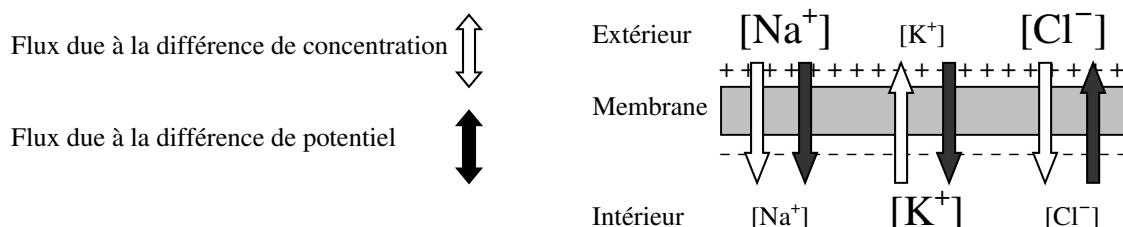
Il existe une différence de potentiel transmembranaire : $V = V_{\text{int}} - V_{\text{ext}} = -70 \text{ mV}$

L'intérieur de la membrane (axoplasme) est polarisé négativement et l'extérieur (milieu interstitiel) est polarisé positivement.



La différence de concentration entre l'intérieur et l'extérieur de la fibre, va induire un mouvement des ions de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée.

La différence de potentiel va elle aussi induire un mouvement des ions vers la zone de charge opposée à celle des ions.



Ion	Concentration intérieure C_{int} (mmol.l ⁻¹)	Concentration extérieure C_{ext} (mmol.l ⁻¹)	Valence Z	Force diffusion (mV)	Force électrique (mV)	Force net (mV)
Na ⁺	15	150	+1	+62	+70	+142
K ⁺	150	5,5	+1	-88	+70	-18
Cl ⁻	9	125	-1	-70	+70	0

La force de diffusion est le potentiel d'équilibre donnée par la loi de Nerst-Donnan :

$$V_{eq} = -\frac{kT}{Ze} \times \ln \frac{C_{int}}{C_{ext}} \text{ avec } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$$

k est appelée constante de Boltzmann, T est la température en Kelvin, Z est la valence de l'ion et e est la charge élémentaire. A une température de 37°C, $\frac{kT}{e} = 26,7 \text{ mV}$.

La force électrique est donnée par la différence de potentiel $V = V_{départ} - V_{arrivée}$, suivant le sens de déplacement de l'ion sous l'effet du potentiel électrique de la membrane.

La force est dite positive (négative) si elle cause un gain (une perte) de charges positives pour l'intérieur de la membrane. Le courant membranaire qui en découle est dit positif (négatif).

On définit la conductance g_{ion} (perméabilité) de la membrane pour un ion donnée par :

$$V_{ion}^{net} \times g_{ion} = I_{ion}$$

Force net (mV) × Conductance (mΩ) = Courant transmembranaire (μA)

D'après le tableau ci-dessus, seul l'ion Cl⁻ est en équilibre, c'est à dire qu'il y a égalité des flux membranaires entrants et sortants.

Pour les deux cations Na⁺ et K⁺, il n'y a pas d'équilibre c'est à dire pas d'égalité des flux entrants et sortants.

Pour l'ion Na⁺, il y a plus d'ions qui entrent que d'ions qui sortent.

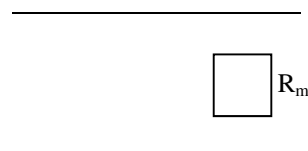
Pour l'ion K⁺, il y a plus d'ions qui sortent que d'ions qui entrent.

Puisque la membrane n'est pas imperméable aux ions et que les concentrations intérieures et extérieures en Na⁺ et K⁺ sont constantes, il doit y avoir un mécanisme actif, consommateur d'énergie qui pompe constamment le sodium de l'intérieur vers l'extérieur et le potassium de l'extérieur vers l'intérieur. Ce mécanisme est appelé la pompe sodium-potassium (pompe Na-K) qui puise son énergie dans l'hydrolyse de l'ATP.



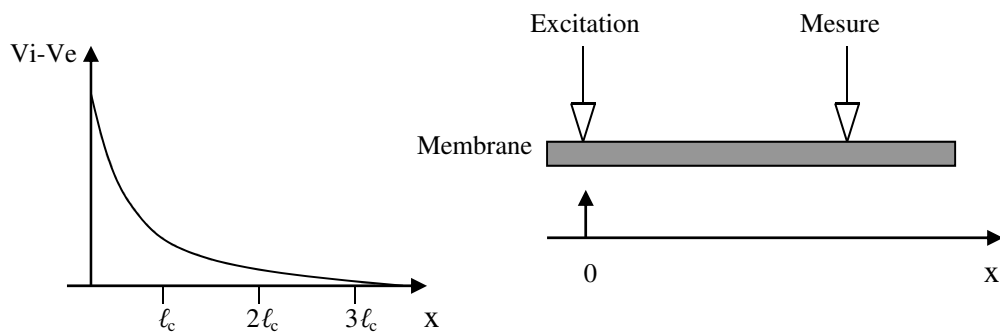
11- Réponse à un faible stimulus :

L'équivalent électrique de la membrane au repos est un condensateur de capacité C_m avec une résistance R_m en parallèle.



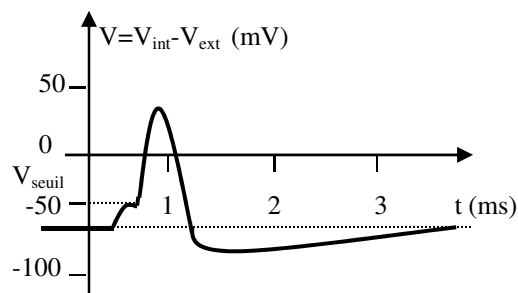
Il n'est pas possible de transmettre un signal électrique par simple conduction dans l'axoplasme sur des distances supérieures à 1mm pour les fibres non myélinisées, supérieures à 1cm pour les fibres myélinisées, à cause des fuites de courant à travers la membrane. Un mécanisme entièrement différent doit être envisagé.

Dans les conditions de faible stimulus, où les propriétés de la membrane ne changent pas, il ne peut y avoir de propagation d'un signal électrique car ce dernier est vite atténué. Le potentiel diminue à mesure que l'on s'éloigne du point d'excitation et s'annule rapidement.



12- Réponse à un fort stimulus :

Si le potentiel d'excitation dépasse un certain seuil (20mV), on constate l'apparition d'une impulsion de tension appelée *potentiel d'action* (PA) qui dure environ 1ms. Le potentiel de la membrane passe de -70mV à +40mV avec un retour moins rapide (4-5ms) à la normale.



On remarque que la forme et la vitesse du potentiel d'action sont indépendantes de l'amplitude de l'excitation pourvu qu'elle soit supérieure au potentiel V_{seuil} . Le potentiel d'action obéit à *la loi du tout ou rien* : Pas de réponse au dessous du seuil par contre réponse normalisée au dessus du seuil.

13- Données expérimentales :

La série d'expériences effectuées par les anglais Hodgkin et Huxley¹ dans les années cinquante a permis de comprendre les phénomènes observés (Prix Nobel de Médecine en 1963). Par des mesures à potentiel imposé, ils ont pu mesurer, lors de l'excitation, la densité des courants qui traversent la membrane en fonction du temps et identifié les ions responsables de ces courants.

On observe (voir figure ci-dessous) au départ un courant vers l'intérieur pendant une durée inférieure à la milliseconde et qui est comparable à la durée du potentiel d'action (de la pointe). Puis un courant vers l'extérieur qui atteint une valeur stable (limite) au bout de 4-5ms.

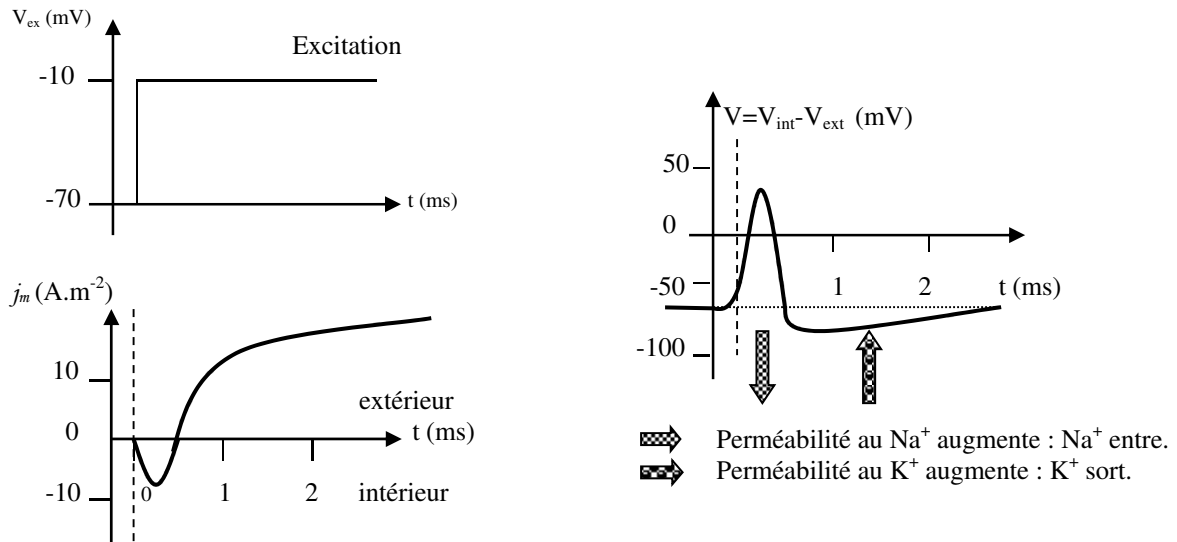
Le courant dirigé vers l'axoplasme est dû à une entrée rapide des ions Na^+ . Cette entrée est facilitée par une augmentation de la perméabilité de la membrane aux ions Na^+ .

Le courant dirigé vers le milieu extérieur est dû à une entrée moins rapide cette fois-ci des ions K^+ . Cette entrée est facilitée par une augmentation de la perméabilité de la membrane aux ions K^+ .

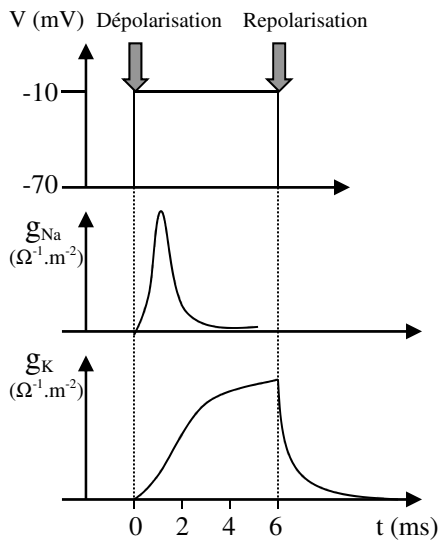
Il apparaît donc qu'à l'excitation (pour $V \geq V_{seuil}$), la perméabilité de la membrane aux ions Na^+ augmente soudainement et le potentiel de la membrane se rapproche du potentiel d'équilibre de cet ion ($V_{eq}^{Na} = +62 mV$),

¹ A.L.Hodgkin and A.F.Huxley, 1952, J.Physiol, 117, 500-544.

ce qui donne la dépolarisation de la membrane. Ce flux d'ions Na^+ diminue rapidement et un flux progressif en sens inverse d'ions K^+ s'établit et le potentiel de la membrane diminue et se rapproche de la du potentiel d'équilibre de cet ion ($V_{eq}^{\text{K}} = -88 \text{ mV}$) et se stabilise vers le potentiel de repos ($V_0 = -70 \text{ mV}$) et la membrane se repolarise.



Le sens du courant qui traverse la membrane, est au début vers l'intérieur puis vers l'extérieur.



La membrane modifie sa conductance (perméabilité) pour les ions Na^+ et K^+ . La membrane se dépolarise à cause du flux d'ions Na^+ . Elle se repolarise grâce aux flux d'ions K^+ .

14- Propagation du potentiel d'action dans une fibre sans myéline :

La propagation du potentiel d'action consiste en une dépolarisation locale de la membrane qui se propage de proche en proche. Cette propagation est associée à :

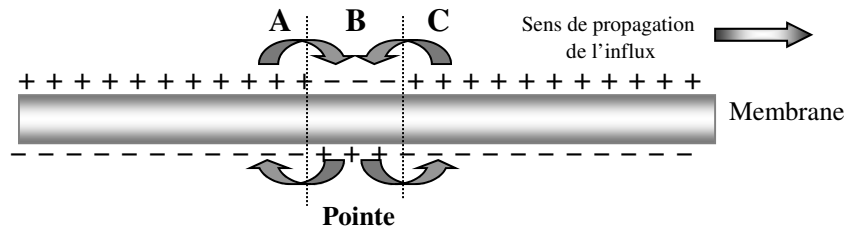
1. Une onde électrique donnée par $V(x,t)$.
2. Une onde de perméabilité de la membrane donnée par $g_{\text{Na}}(x,t)$ et $g_{\text{K}}(x,t)$.
3. Une onde de dépolarisation qui correspond à un dipôle se propageant à la vitesse v .

Il existe une relation entre la vitesse de propagation et le rayon de la fibre donnée par :

$$v \propto \sqrt{a}$$

La vitesse de propagation augmente avec le rayon de la fibre, mais assez lentement.

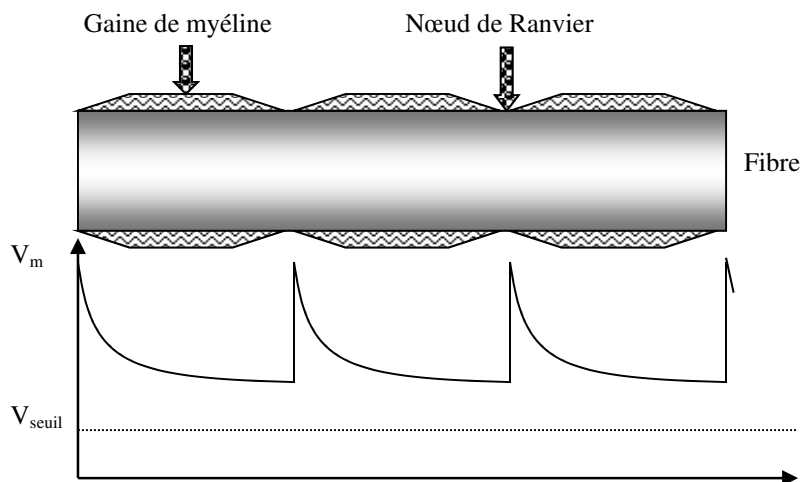
La propagation est due à un déplacement des charges électriques de proche en proche. Ces déplacements créent des courants locaux tant à l'extérieur de la fibre qu'à l'intérieur de celle-ci.



La zone B, siège d'une pointe a une polarisation inversée (dépolarisée). Les courants locaux indiqués par les flèches ont pour effet d'augmenter la différence de potentiel de la membrane dans les zones voisines A et C. En C lorsque la différence de potentiel arrive au potentiel seuil une pointe apparaît. Ainsi est assuré de proche en proche la propagation de l'influx. Par contre la zone A qui a été excitée avant B, n'est pas sensible à la dépolérisation, car elle est en période réfractaire². C'est le potentiel d'action qui déclenche l'excitation de son voisinage et assure ainsi sa propagation.

15- Propagation du potentiel d'action dans une fibre myélinisée :

La gaine de myéline offre une grande résistance au passage du courant et doit être considérée comme un isolant. Les fibres avec une gaine de myéline permettent une propagation rapide de l'influx nerveux et ceci malgré des diamètres de fibres petits. Le signal se propage comme dans un câble électrique, donc à très grande vitesse, pour les régions myélinisées. Le signal est atténué, mais arrive toujours au nœud de Ranvier avec un potentiel supérieur au seuil. Une pointe apparaît et le signal se régénère. C'est la propagation saltatoire.



La vitesse de propagation est cette fois reliée au rayon de la fibre par la relation :

$$v \propto a$$

Donc la fibre myélinisée conduit plus rapidement que la fibre nue, mais la variation de la vitesse de propagation avec le rayon de la fibre est plus rapide.

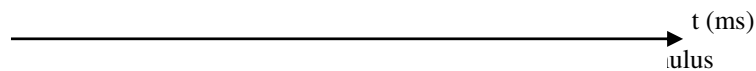
16- Relation Intensité du courant-Durée du stimulus :

L'intensité liminaire I_e est l'intensité au dessous de laquelle il n'y a pas d'apparition de pointe.

L'intensité liminaire porte le nom de *rhéobase* si le courant de stimulation est rectangulaire et de durée infinie.

² Période suivant la pointe (1-2ms) durant laquelle le seuil d'excitabilité reste élevé.

Le temps utile est la durée minimum du stimulus, d'intensité rhéobasique, pour produire une pointe.
La chronaxie est la durée de passage nécessaire pour qu'un courant double de la rhéobase crée une pointe.
La chronaxie est une valeur arbitraire qui renseigne sur la vitesse de conduction de la fibre et la durée du potentiel d'action (environ 6 chronaxies).



Nous pouvons écrire l'équation suivante entre l'intensité liminaire I_l et la durée t du stimulus :

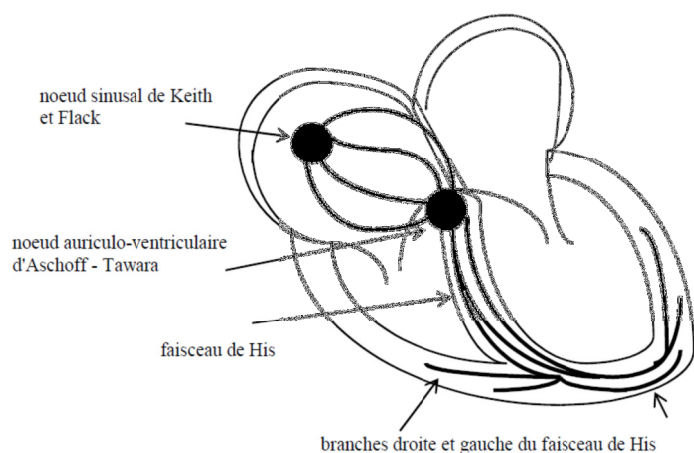
$$I_l = \frac{Q_0}{t} + \text{Rhéobase}$$

Où Q_0 est la quantité d'électricité seuil donnée par :

$$Q_0 = \text{Rhéobase} \times \text{Chronaxie}$$

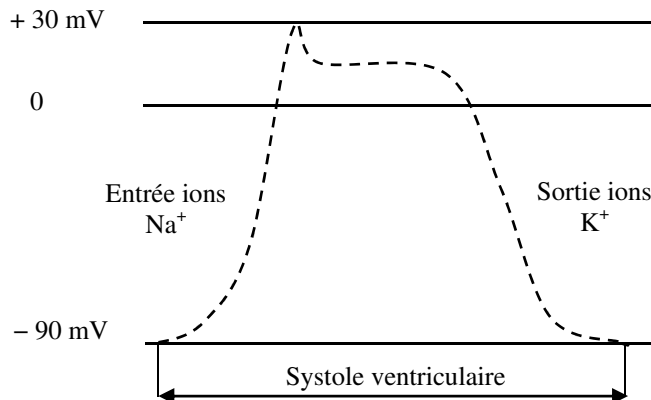
16- Activité électrique du cœur :

La contraction du myocarde est provoquée par la propagation d'une impulsion électrique le long des fibres musculaires cardiaques induite par la dépolarisation des cellules musculaires. La dépolarisation prend normalement naissance dans le haut de l'oreillette droite (le sinus), et se propage ensuite dans les oreillettes, induisant la systole auriculaire qui est suivie d'une diastole (décontraction du muscle). L'impulsion électrique arrive alors au nœud auriculo-ventriculaire (AV), seul point de passage possible pour le courant électrique entre les oreillettes et les ventricules. L'impulsion électrique y subit une courte pause permettant au sang de pénétrer dans les ventricules. Elle emprunte alors le faisceau de His, qui est composé de deux branches principales allant chacune dans un ventricule. Les fibres constituant ce faisceau, complétées par les fibres de Purkinje, grâce à leur conduction rapide, propagent l'impulsion électrique en plusieurs points des ventricules, et permettent ainsi une dépolarisation quasi instantanée de l'ensemble du muscle ventriculaire. Cette contraction constitue la phase de systole ventriculaire. Puis suit la diastole ventriculaire (décontraction du muscle) ; les fibres musculaires se repolarisent et reviennent ainsi à leur état initial.



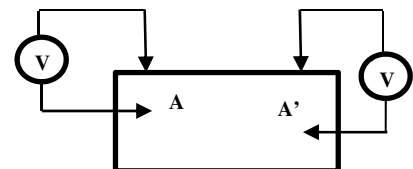
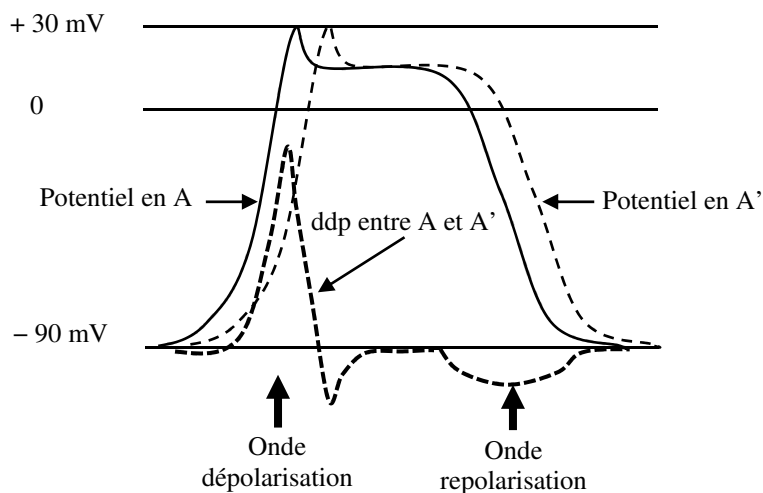
Cellule myocardique isolée :

Au repos, il existe une différence de répartition des ions de part et d'autre de la membrane comme pour la fibre nerveuse. Ceci induit une différence de potentiel de repos $V_0 = V_{int} - V_{ext} = -90 \text{ mV}$. Ce potentiel de repos est maintenu grâce au travail effectué par la pompe Na-K qui fait sortir les ions Na^+ et fait entrer les ions K^+ à l'intérieur de la cellule. Quand un stimulus électrique excite la membrane, la pompe s'interrompt et un flux d'ions Na^+ pénètre dans la cellule ce qui la dépoliarise. Ce flux est alors enrayé par un flux sortant d'ions K^+ qui repolarise la membrane puis intervient le redémarrage de la pompe.



Variation de potentiel aux bornes de la cellule :

On enregistre en deux points A et A' les potentiels $V_A(t)$ et $V_{A'}(t)$ et on trace la différence de potentiel (ddp) $V_A - V_{A'}$. Les potentiels enregistrés en A sont identiques à ceux en A' mais ces derniers sont en retard par rapport aux premiers.



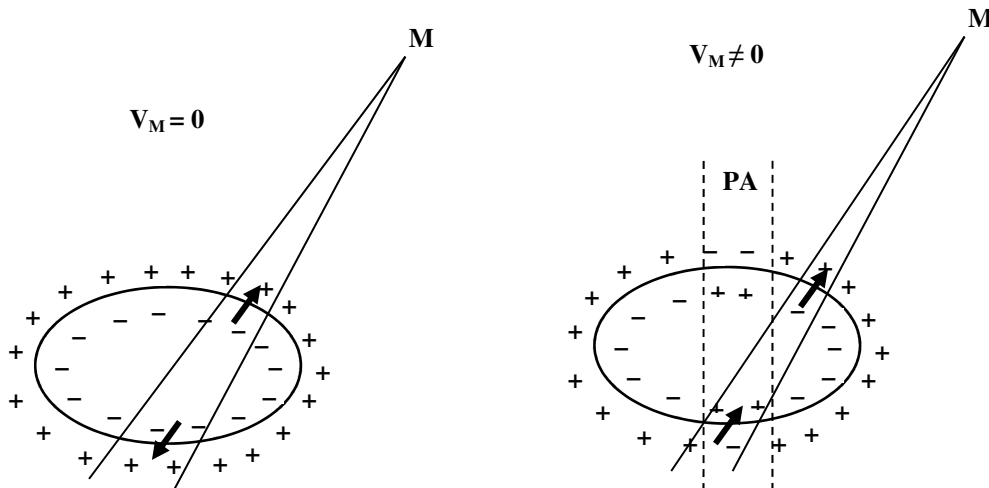
C'est une onde diphasique qui constitue l'*électrocardiogramme* (ECG) de la cellule myocardique isolée. La première phase correspond à la dépolarisation (variation rapide et brève de l'amplitude) et la deuxième phase se produit pendant la repolarisation (variation plus lente et plus faible de l'amplitude). L'onde de repolarisation est en sens inverse.

La cellule assimilée à un dipôle :

Pendant la dépolarisation et la repolarisation, la surface où se propage le potentiel d'action peut être assimilée à un dipôle électrique qui se déplace. En un point M repéré par ses coordonnées polaire (r,θ) du centre du dipôle, nous enregistrerons un potentiel V donné par :

$$V = \frac{kp \cos \theta}{r^2}$$

Où p est le moment dipolaire et k la constante électrique.

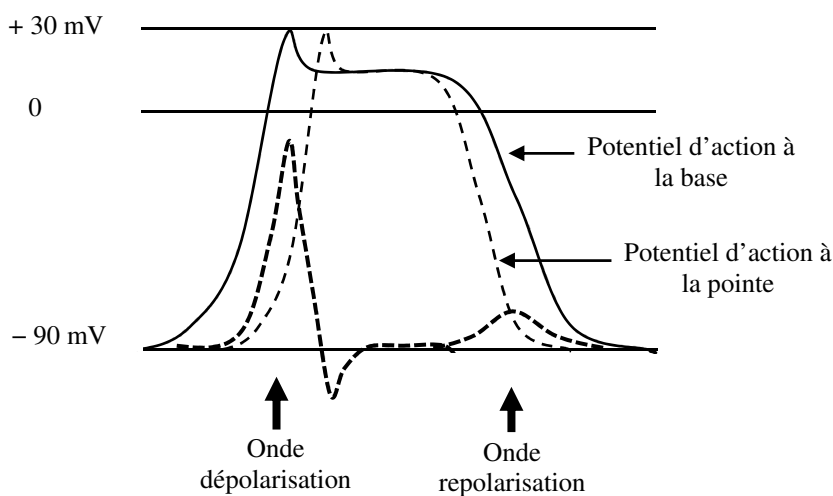


Le potentiel créé par une cellule au repos en un point M extérieur à celle-ci est nulle. Par contre le potentiel créé au point M par une cellule en cours d'activation est différent de zéro.

Le cœur entier :

Le cœur entier peut être assimilé à un dipôle unique pendant les phases de dépolarisation repolarisation. L'excitation macroscopique du cœur peut être représenté à tout instant par un vecteur instantané unique. Mais il existe deux différences :

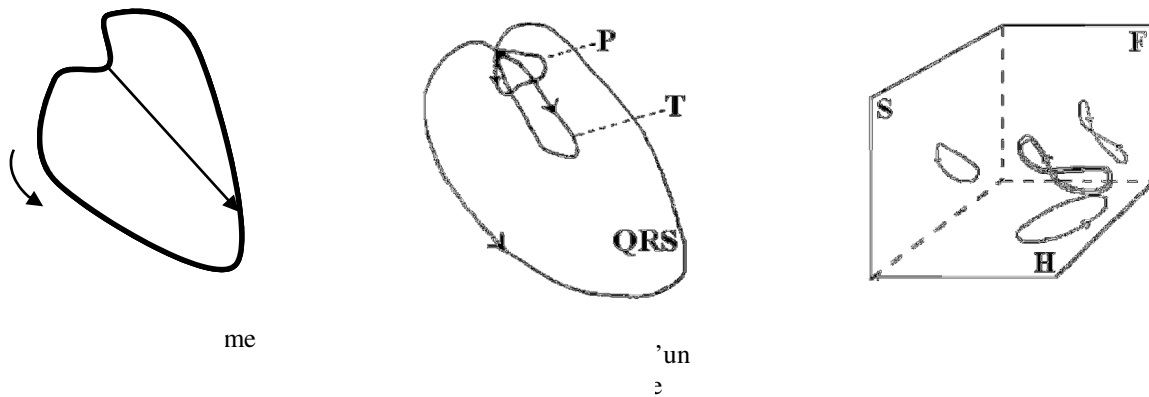
1- Les potentiels d'action n'ont pas la même vitesse de conduction à la base du cœur et à la pointe. Ils sont plus bref au niveau de la pointe. L'électrocardiogramme du ventricule donne :



L'ECG est bien diphasique mais l'onde de repolarisation est dans le même sens que l'onde de dépolarisation. Les ventricules se dépolarisent par la base et se repolarisent par la pointe.

2- Les vecteurs instantanés \vec{p} changent sans cesse de direction. L'excitation suit un chemin complexe. Il est possible de séparer la chronologie des excitations : dépolarisation auriculaire, repolarisation auriculaire,

dépolarisation ventriculaire et repolarisation ventriculaire. Les extrémités des vecteurs p dessinent une boucle vectorielle qui se déroule dans l'espace et dans le sens antihoraire. Il existe en fait quatre boucles qui se succèdent mais seulement trois sont visibles. En effet la boucle de dépolarisation ventriculaire masque la boucle de repolarisation auriculaire.

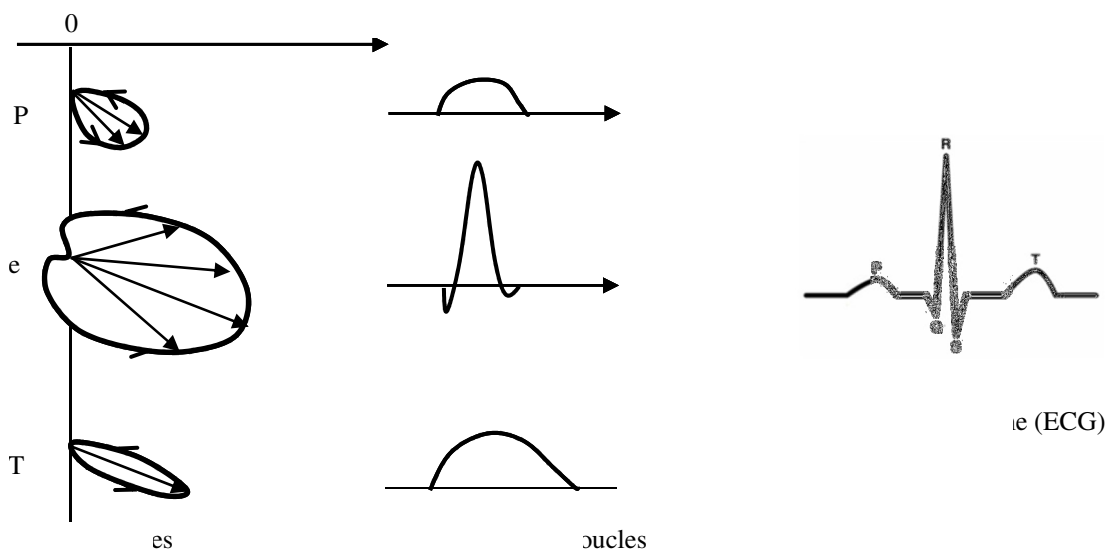


L'électrocardiogramme (ECG) résulte de la projection de ces trois boucles selon différents plans (frontal, horizontal et sagittal) et sur différents axes orientés qui sont *les dérivations*. Ci-dessous un exemple du tracé électrique obtenu dans le plan frontal :

La boucle de dépolarisation auriculaire se traduit par *l'onde P*.

La boucle de dépolarisation ventriculaire se traduit par *le complexe QRS*.

La boucle de repolarisation ventriculaire se traduit par *l'onde T*.



17- Les dérivations de l'ECG :

Par définition, ce sont les droites orientées passant par les points où sont placées les électrodes de mesures. La forme et l'amplitude de l'ECG dépendent de la direction et du sens de ces dérivations. Il existe douze dérivations uniformisées :

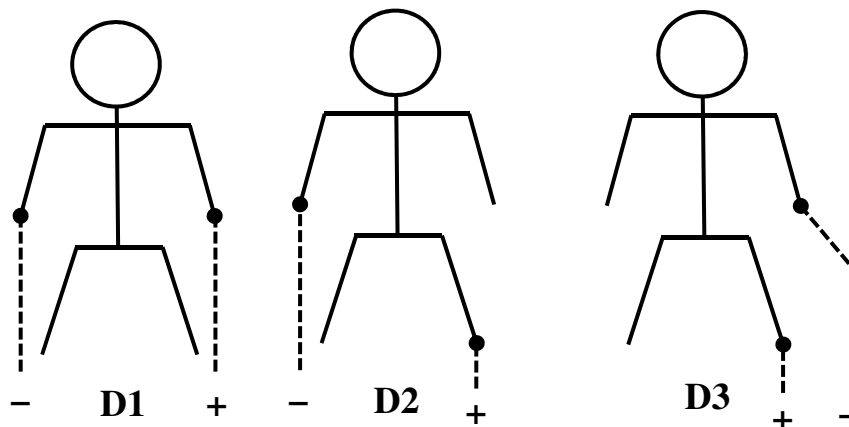
- 3 dérivations bipolaires des membres ou dérivations standards.
- 3 dérivations unipolaires des membres.
- 6 dérivations précordiales.

Dérivations bipolaires ou standards :

Elle sont dites bipolaires car chaque dérivation permet l'enregistrement d'une différence de potentiel (ddp) entre deux endroit des membres qui sont **le poignet droit, le poignet gauche et la cheville gauche**.

Nous avons alors trois combinaisons possible :

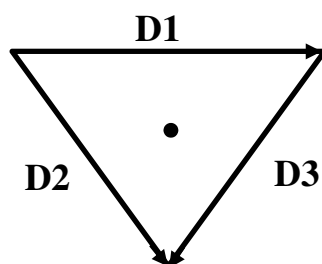
- Dérivation D1 : poignet droit (-) → poignet gauche (+).
- Dérivation D2 : poignet droit (-) → cheville gauche (+).
- Dérivation D3 : poignet gauche(-) → cheville gauche (+).



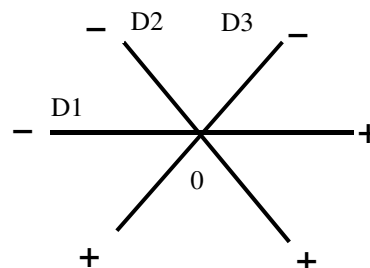
Les membres ne sont en fait que des conducteurs. On peut considérer comme identiques les dérivations :

- Dérivation D1 : épaule droite (-) → épaule gauche (+).
- Dérivation D2 : épaule droite (-) → pubis (+).
- Dérivation D3 : épaule gauche(-) → pubis (+).

Ces trois points peuvent être considérés comme étant approximativement équidistants du cœur. Ces trois dérivations forment un triangle dont le cœur est le centre :c'est **le triangle d'Einthoven**. Le centre du triangle est considéré au potentiel nul. C'est l'origine des vecteurs. Il existe une autre représentation équivalente dite **le triaxe de Bayley**.

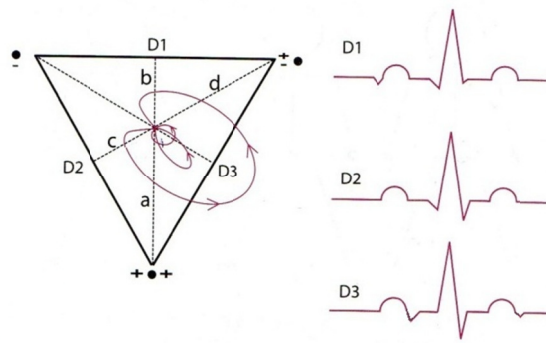


Triangle d'Einthoven



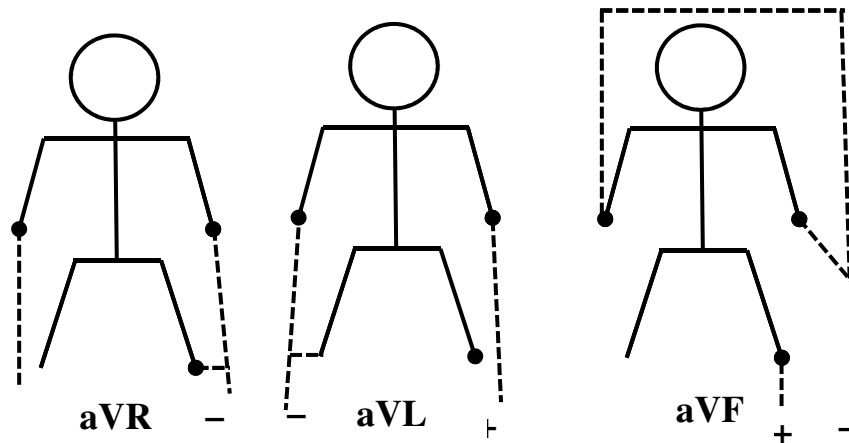
Triaxe de Bayley

Les tracés obtenus selon ces trois dérivations résultent de la projection des trois boucles vectorielles sur un plan frontal puis de la projections de ces boucles projetées sur les trois axes orientés D1, D2, et D3.

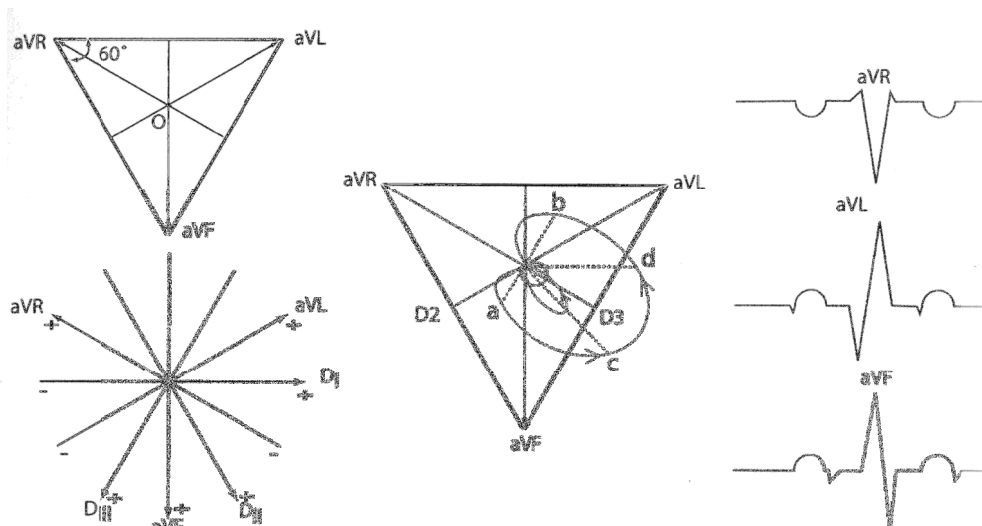


Dérivations unipolaires :

Elles comportent une électrode exploratrice placée au niveau du poignet gauche ou poignet droit ou cheville gauche et une électrode de référence assimilée au potentiel zéro. L'électrode de référence est réalisée en court-circuitant les deux électrodes non exploratrices. Les dérivations obtenues sont appelées aVR, aVL et aVF. *a* pour *augmented*, *R* pour *Right*, *L* pour *Left* et *F* pour *Foot*.



Ces dérivations se trouvent également dans le plan frontal et elles sont les bissectrices des trois angles du triangle d'Einthoven.



Dérivations précordiales :

Ce sont des dérivations rapprochées unipolaires. L'électrode exploratrice est placée sur des points précis de la paroi thoracique. Elles se situent grossièrement dans le plan horizontal.

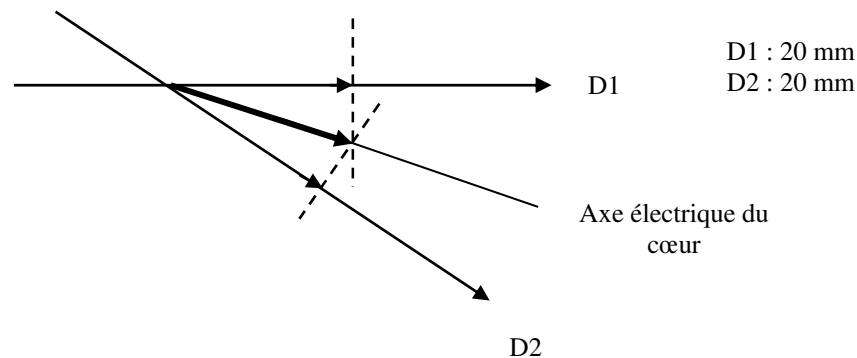
18- L'axe électrique du coeur :

L'axe électrique du cœur est donné par la somme de tous les vecteurs instantanés représentatifs de l'excitation :

$$\vec{P} = \sum_{i=1}^n \vec{p}_i$$

En pratique, on procède à des approximations. La dépolarisation ventriculaire est l'évènement prédominant dans la propagation de l'excitation : on se servira donc du complexe ventriculaire rapide dans la détermination de l'axe. De plus, le plus grand vecteur projeté (plus grande amplitude sur le tracé) donne globalement la direction générale de propagation de l'excitation. On utilisera donc la plus grande amplitude des complexes rapide pour deux dérivations dans le plan frontal (D, D2, D3, aVL, aVR, aVF)

Déterminer l'axe électrique du cœur revient à chercher le vecteur qui permet de retrouver les amplitudes sur les deux dérivations.



Fin du premier chapitre

Bibliographie :

1. Biophysique, Physico-chimie/physique PCEM1-PCEM2, J. Magné et R.M. Magné-Marty, édition Ellipse.
2. Physique pour les sciences de la vie. 3 :Les ondes, A. Boussy, M. Davier et B. Gatty, édition Belin.
3. Elément de biophysique 1, F. Grémy et F. Leterrier, édition Flammarion.
4. Biophysique du neurone (collection abrégés), M. Burgeat et D. Kayser, édition Masson.
5. Physique 2, 1500 problèmes résolus, Maxi Schaum, édition Mc Graw-Hill.
6. Physique générale 2, électricité et magnétisme, D.C. Giancoli, édition DeBoeck université.