

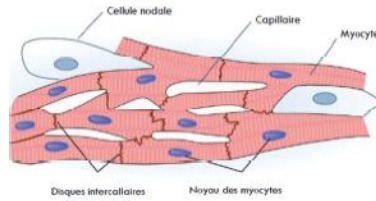
I) Propriétés électriques des cellules cardiaques

A chaque cycle cardiaque toutes les fibres se contractent ensemble.

L'automatisme cardiaque est une propriété **intrinsèque** du cœur. Elle n'est pas apportée au cœur grâce à une innervation par le SNC.

Différents types de cellules cardiaques :

- Les **cardiomyocytes**
- Les **cellules nodales**

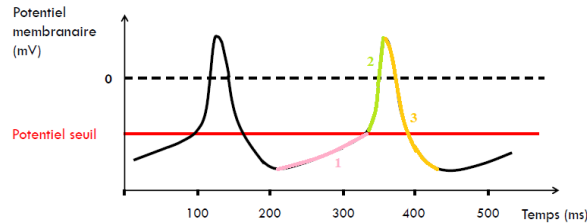


1) Cellules nodales

A) Nature des cellules nodales

- **Cellule pace maker:** Ouverture spontanée possible de canaux présent à la surface de samembrane plasmique capable de générer un rythme
- **Cellule excitable:** Déclenchement d'un potentiel d'action lorsque le potentiel de membrane atteint une valeur seuil.

B) Potentiels d'action de la cellule nodale



- 1 : ≈ 150ms **Dépolarisation spontanée**
- 2 : ≈ 50ms **Potentiel d'action**
- 3 : **Repolarisation**

C) Propriétés des cellules nodales

1^{ère} propriété : « rythme et fréquence »

- **Rythme:** succession de modifications électriques produites par l'ouverture spontanée de canaux ioniques. *Dépolarisation lente* → Potentiel d'action → *Dépolarisation lente...*
- **Fréquence:** nombre de modifications électriques identiques par unité de temps.

2^{ème} propriété : « Vitesse de propagation du PA variable »

- **Rapide** dans les **oreillettes** et les **ventricules**
 - **Lente** dans le **nœud auriculo-ventriculaire** en ralentissant le PA, ça permet aux oreillettes de se dépolariser complètement avant que les ventricules ne se dépolarisent
- Cette vitesse variable du PA est essentielle à la synchronisation du cœur

Dmarie ☺

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou v

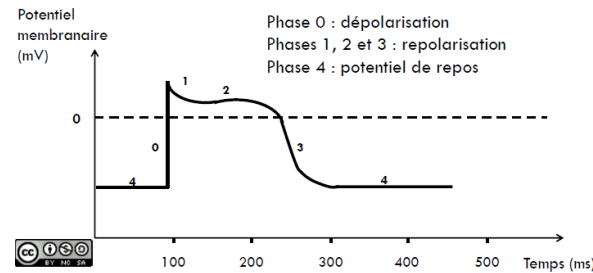
3^{ème} propriété : « Dépolarisation spontanée du tissu nodal : Fréquence variable »

- La fréquence la plus élevée est celle du **nœud sino-auriculaire**
 - La fréquence la moins élevée est celle des **fibres du réseau de Purkinje**
 - De manière intermédiaire il y a la fréquence du **nœud auriculo-ventriculaire**
- S'il y a interruption de la conduction du trajet du tissu nodal. Le cœur bat à une fréquence inférieure puisque le nœud AV et le réseau de Purkinje s'autonomisent et créent le rythme cardiaque

2) Cardiomyocytes

A) Propriétés des cardiomyocytes

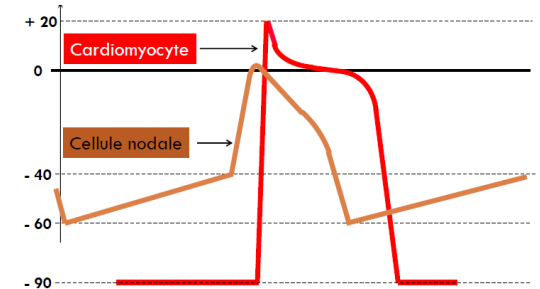
1^{ère} propriété : « cellules excitables »



Elles se dépolarisent lorsque leur potentiel de membrane atteint une valeur seuil. Mais elles n'ont aucun rythme propre et **dépendent entièrement du tissu nodal** pour se dépolariser.

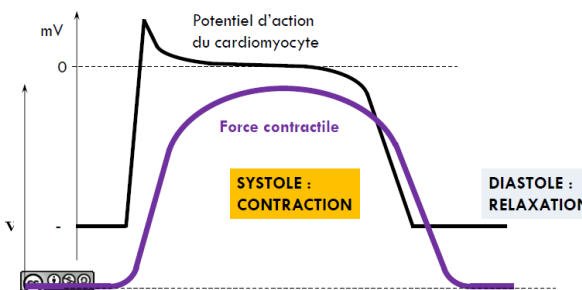
Pour déclencher un potentiel d'action, le cardiomyocyte a besoin de recevoir l'excitation du potentiel d'action de la cellule nodale :

- **La cellule nodale** se dépolarise spontanément jusqu'à un seuil
- **Le cardiomyocyte**, lorsque le potentiel d'action de la cellule nodale va être au pic, va commencer à déclencher son propre potentiel d'action.



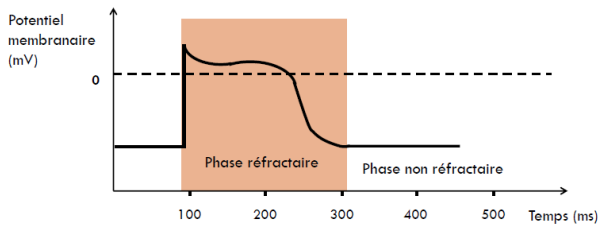
→ Il y a un couplage électrique entre les potentiels d'action des cellules nodales et des cardiomyocytes

2^{ème} propriété : « cellules contractiles »



Le potentiel d'action correspond à la **contraction** et à la **relaxation** du cardiomyocyte

3^{ème} propriété : « cellule réfractaire »



Pendant la durée de son potentiel d'action, le cardiomyocyte est réfractaire au déclenchement d'un nouveau potentiel d'action.

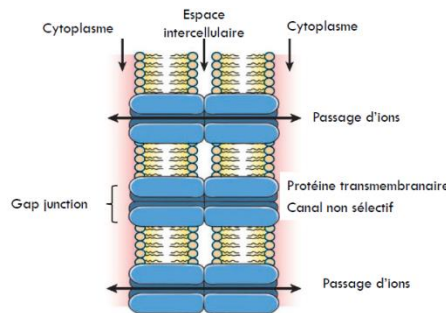
➔ Conséquence : le myocyte se relaxe obligatoirement; la contraction permanente et soutenue du myocarde est impossible

4^{ème} propriété : cellule conductrice

Les **gaps junctions** assurent un **couplage électrique** entre les cardiomyocytes, grâce à la mise en commun du cytoplasme des cardiomyocytes.

Le **courant intracellulaire est continu**.

On a donc **une conduction du potentiel d'action entre cardiomyocytes**



B) Squelette fibreux du cœur

Définition : Tissu fibreux séparant les cardiomyocytes des oreillettes de ceux des ventricules.

Rôle mécanique : Insertion des valves cardiaques.

Rôle électrique :

1/ Le potentiel d'action des cellules auriculaires ne parvient aux cellules ventriculaires que par le tissu nodal;

2/ Absence de continuité entre les cardiomyocytes auriculaires et ventriculaires (pas de gap-junctions).

C) Conséquences mécaniques des propriétés électriques du cœur

« **Même débit dans le cœur droit et dans le cœur gauche** »

La contraction simultanée du cœur droit (OD, VD) et du cœur gauche (OG, VG) assure le **couplage** entre la circulation pulmonaire et la circulation générale

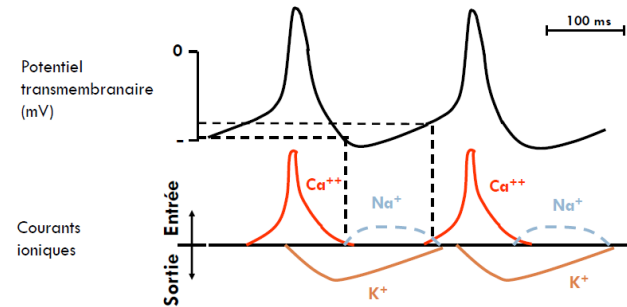
« **Débit cardiaque = fréquence cardiaque x volume d'éjection** »

Le **systole auriculaire précède la systole ventriculaire** : ce décalage temporel permet un remplissage optimal des ventricules et donc une optimisation du débit cardiaque

3) Les canaux ioniques

A) Courants ioniques

a) De la cellule nodale



Dépolarisation spontanée correspond à 2 flux :

➤ Un **courant potassique** qui s'estompe et qui est plutôt pour une **repolarisation**.

➤ Un **courant sodique** permet la **dépolarisation**

➔ **Le courant sodique est plus fort que le courant potassique**

Potentiel d'action

Lorsqu'on arrive au potentiel seuil, **les canaux calciques** vont s'ouvrir (voltage-dépendants) Il y a une entrée de calcium dans le cytoplasme : la cellule se dépolarise. Lorsque le potentiel atteint une valeur positive, **les canaux se ferment**.

Repolarisation

Les différentes pompes rétablissent le potentiel de membrane, on retombe au niveau le plus bas, puis le cycle recommence

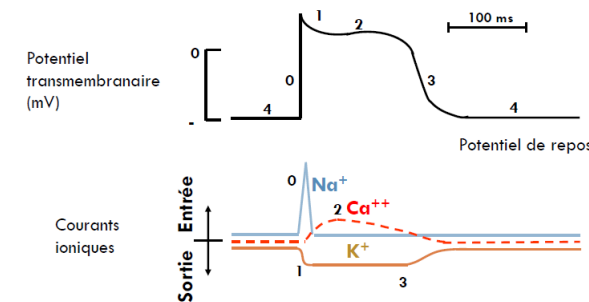
b) Du cardiomyocyte

Phase 0 : Brusque entrée de **sodium**

Phase 1 : Fermeture des **canaux Na+**, ouverture des **canaux potassiques**

Phase 2 : **canaux K+tjr** ouverts, Ouverture des **canaux calciques**

Phase 3 : Fermeture des **canaux calciques**, les **canaux K+tjr** ouverts permettent la repolarisation



B) Les différents canaux

a) Les canaux sodiques

• **Des cardiomyocytes**

Les canaux sodiques du cardiomyocytes sont **voltage-dépendants**. Ce sont les mêmes que ceux de l'axone. Ils sont responsables de la **phase 0 du potentiel d'action**.

• **Des cellules nodales**

Ils ne sont pas voltages-dépendants. Ce sont des canaux de type **F (Funny)**, ils s'ouvrent spontanément. Ils sont responsables de la **dépolarisation spontanée**.

b) Les canaux potassiques

• **Des cardiomyocytes**
De plusieurs types, ils interviennent dans les phases 1, 2 et 3 du potentiel d'action

• **Des cellules nodales**
Interviennent pendant la phase de dépolarisation spontanée (cible de médicaments) et de repolarisation.

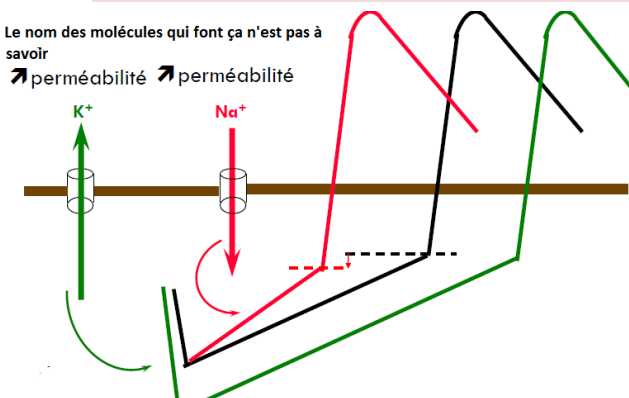
c) Les canaux calciques

• **Des cardiomyocytes**
Ils sont **voltage-dépendant**. Ils sont responsables de la **phase 2** du potentiel d'action

• **Des cellules nodales**
Ils sont **voltage-dépendant** également. Ils sont responsables de la **phase de dépolarisation rapide** du potentiel d'action.

4) Application médicale

A) Modification de la perméabilité des canaux Na+ de type F et des canaux K+



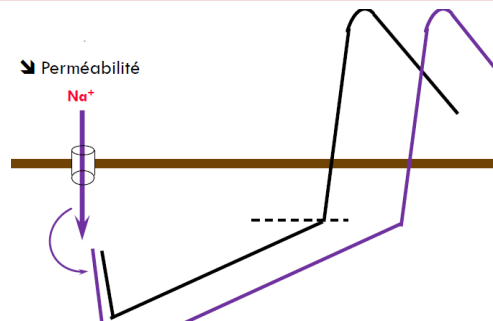
En ↗ la **perméabilité du canal Na+** de type F, on va accélérer la dépolarisation : le seuil de est abaissée
 → ↗ **fréquence cardiaque**

En ↗ la **perméabilité des canaux K+** le cytoplasme devient plus négatif, ça retarde l'atteinte du potentiel seuil de la cellule nodale.
 → ↘ **fréquence cardiaque**

→ **Le système nerveux autonome, pour modifier la fréquence cardiaque, modifie la perméabilité des canaux Na+ ou des canaux K+ des cellules nodales.**

B) Effet de l'inhibition du canal sodique de type F

Si on ↘ la **perméabilité du canal Na+**, on ↘ la dépolarisation
 → On ↘ la **fréquence cardiaque**, on augmente le temps de dépolarisation spontanée



Dmarie ☺

C) Modification du potentiel de repos

Ex de l'infarctus : Une des coronaire se bouche → La zone irriguée par cette coronaire est en ischémie → baisse de la production d'ATP → diminution du régime des pompes à sodium → le potentiel de repos se modifie vers la dépolarisation → potentiels d'action asynchrone avec le reste du réseau cardiaque → le cœur va se mettre à **fibriller**.

→ **Modification du rythme et de la fréquence cardiaque**

Hyper/hypokaliémie : Très dangereux (troubles du **rythme** cardiaque, anomalies de la **conduction** du PA, états de fibrillation par **asynchronisme** des PA)

II) Bases physiques de l'électrocardiogramme

1) Courants induits et galvanomètre

L'activité électrique du cœur induit des courants osmotiques de sens et d'intensité variables dans le temps : l'ECG va les mesurer

A) Enregistrement des courants induits

La peau au contact d'un gel ou les membres immergés dans une solution contenant des osmoles ionisées sont les **électrodes**.

Un câble métallique conducteur d'électricité relie 2 électrodes.

Les courants osmotiques induits sont de **très faible intensité**

Ils peuvent **mobiliser des électrons** dans un circuit électrique situé à l'extérieur de l'organisme.

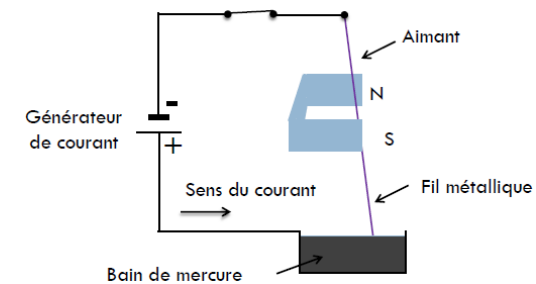
Loi d'ohm : **Potentiel électrique** = intensité du courant x résistances du circuit

B) Galvanomètre

L'appareil utilisé pour mesurer l'intensité des courants induits est un **galvanomètre**.

Le galvanomètre utilise les propriétés du **champ magnétique** de déplacer un fil métallique lorsqu'il est le siège d'un courant

Le galvanomètre utilise les propriétés du champ magnétique de **déplacer un fil métallique** lorsqu'il est le siège d'un courant.



→ Le galvanomètre nous renseigne sur le **sens** (sens de la déviation du fil) et l'**intensité** (importance de la déviation du fil) du courant

Concernant le **galvanomètre à corde** ce qu'il faut savoir c'est qu'il est adapté à la détection de **courants de très faible intensité** et que le principe est le même que celui d'en haut.

2) Vecteur unitaire

L'hauteur de la déflexion de la corde du galvanomètre est proportionnelle à l'intensité du courant induit; proportionnelle aux potentiels d'action instantanés.

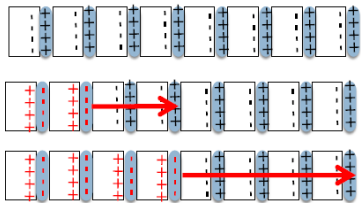
L'orientation de la déflexion de la corde du galvanomètre est liée à l'orientation des potentiels d'action instantanés

➔ Une grandeur orientée et d'intensité déterminée s'appelle un vecteur

Vecteur électrique unitaire = vecteur instantané = dipôle électrique

La force d'un vecteur dépend de sa projection orthogonale sur un axe. Dans le cas d'un vecteur électrique, la force est le potentiel électrique.

Hauteur et sens des déflexions de la corde du galvanomètre = projection orthogonale du vecteur électrique unitaire instantané sur la droite reliant 2 électrodes



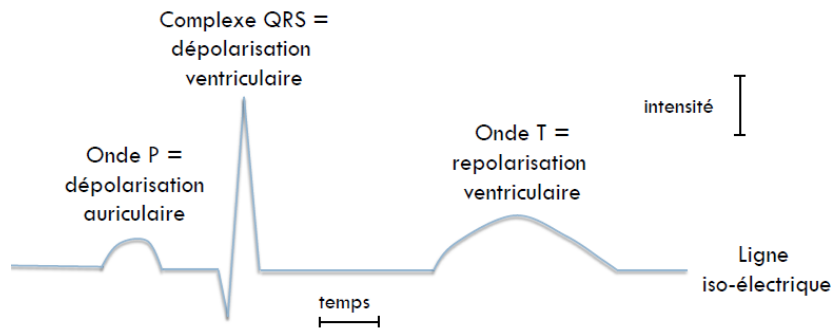
Sens du courant : sens de la flèche

Intensité du courant = Force = potentiel électrique du vecteur : longueur de la flèche

Le potentiel électrique du vecteur unitaire est proportionnel à la somme des potentiels d'action instantanés des cardiomyocytes.

3) Interprétation selon les règles d'Eithoven

Le tracé obtenu par l'enregistrement des courants induits par le cœur sur la peau possède le profil suivant



A) Les règles énoncées par Einthoven

Règle n°1 et ses conséquences

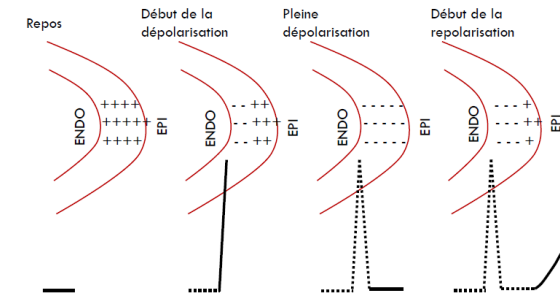
Une électrode placée suffisamment loin du cœur enregistre la somme des potentiels d'action unitaire comme s'il y avait qu'un seul cardiomyocyte qui émettait un potentiel d'action, qu'il s'agissait d'un seul et unique vecteur électrique unitaire.

1^{ère} conséquence : L'intensité des courants induits est proportionnelle à la somme des potentiels d'action instantanés : masse des ventricules > masse des oreillettes.

Intensité de QRS > intensité de P

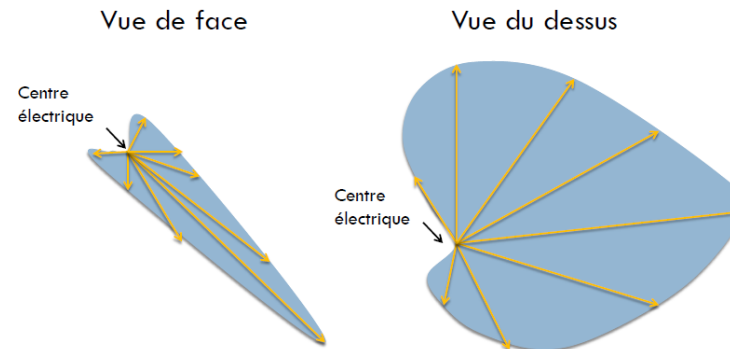
2^{ème} conséquence : La repolarisation auriculaire est masquée par la dépolarisation ventriculaire sur l'électrocardiogramme

3^{ème} conséquence : Le sens du vecteur unitaire est le même lors de la dépolarisation et lors de la repolarisation : les derniers cardiomyocytes qui se dépolarisent sont les premiers qui se repolarisent. Les cellules de l'épicaire se repolarisent en premier.



Règle n°2 et ses conséquences

L'origine du vecteur électrique unitaire est fixe : c'est le centre électrique du cœur qui est un point virtuel (on peut le situer de manière anatomique au niveau du nœud AV)



Au cours du cycle cardiaque, l'ensemble des vecteurs instantanés décrivent une courbe à partir du centre électrique du cœur : le vectocardiogramme.

Règle n° 3 et ses conséquences

Si on prend 3 électrodes et qu'on les câble entre elles 2 à 2, on obtient 3 dériviations : les côtés d'un triangle. Ces axes de projection, pour les vecteurs cardiaques unitaires, s'appelle des dériviations

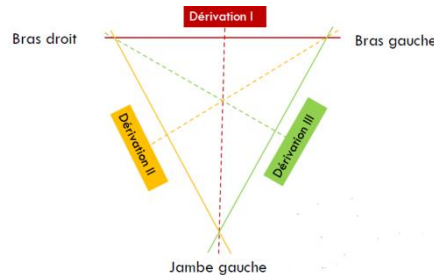
La projection orthogonale du vectocardiogramme sur une dérivation est proportionnelle à l'intensité des courants induits instantanément par l'activité électrique du cœur.

Règle n°4 et ses conséquences

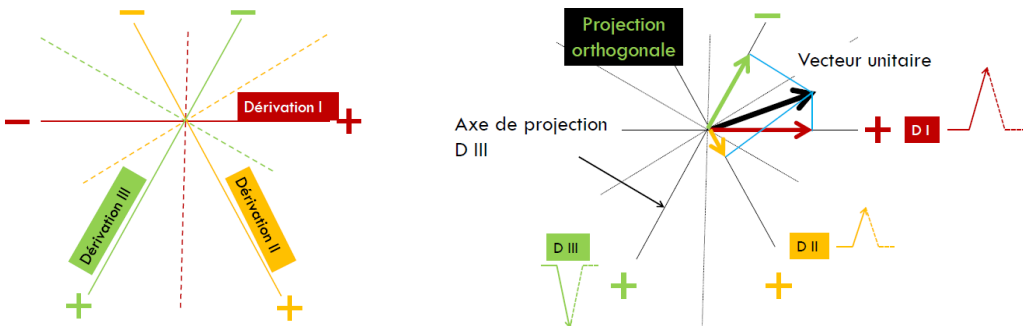
Einthoven a placés ces 3 dériviations de telle sorte qu'elles forment les 3 côtés d'un triangle équilatéral dont le centregéométrique est le centre électrique : le cœur.

B) Le triangle d'Einthoven

Les membres sont conducteurs et les électrodes peuvent être placées à leurs racines ou à leurs extrémités indifféremment (amputation).



C) Axes de projection ramenés au centre électrique du cœur



On a situé un vecteur unitaire (flèche la plus grosse, noire), qui naît du centre électrique du cœur. Il a un sens à un instant donné, une direction

Dans la dérivation D1

Lorsqu'on projette le vecteur unitaire sur DI, on obtient la flèche horizontale (rouge). On obtient le sens (positif ici) et l'intensité (hauteur de la flèche) du courant électrique.

Dmarie ☺

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

Dans la dérivation D2

En DII, on a une déflexion de même sens (positive) mais de moindre intensité correspondant au même vecteur électrique unitaire.

Dans le dérivation D3

On a une flèche qui va du + vers le - : on a un changement de sens du courant (négatif ici) L'intensité est forte puisque la longueur de la flèche est assez longue par rapport au vecteur unitaire

D) Prolongement des règles d'Einthoven par Bailey

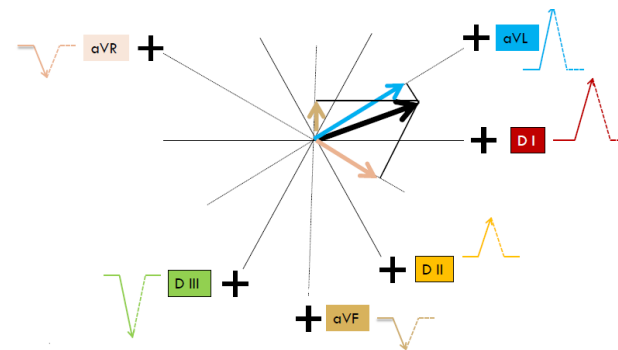
Electrode de référence

Grâce à une électrode de référence on peut enregistrer une différence de potentiel avec une autre électrode placée en n'importe quel point du corps.

Dans un triangle équilatéral, la somme des projections orthogonales d'un vecteur sur les 3 côtés est toujours nulle. La réunion des 3 électrodes positives forme une électrode de référence. C'est la borne centrale de Wilson qui est neutre.

$$\bar{D} I + \bar{D} II + \bar{D} III = 0$$

3 dériviations supplémentaires



- Einthoven avait défini les dériviations DI, DII, DIII qui sont les côtés du triangle.
- Bailey réunit les 3 bissectrices du triangle : les dériviations aVR, aVL, aVF.

Le principe de la projection orthogonale est valable tant que les électrodes sont à distance du cœur.



E) Axe électrique du cœur

→ Vecteur moyen du complexe QRS enregistré dans le plan frontal ayant pour origine le centre électrique du cœur
Son orientation normale est vers la gauche et vers le bas.

Si le cœur hypertrophie (à cause d'un rétrécissement d'une valve par ex) :

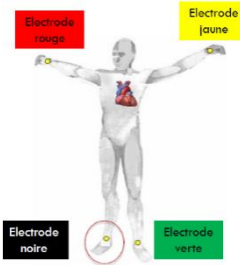
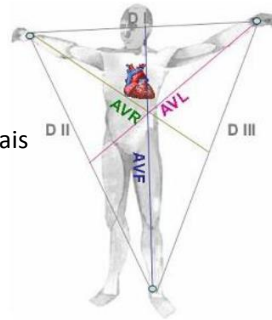
- Cœur droit : l'axe électrique du cœur va être dévié vers la droite.
- Cœur gauche : l'axe électrique du cœur va être dévié vers la gauche.

Si on a un infarctus, on aura une déviation de l'axe du cœur dans les sens opposés

F) Les 6 dérivations périphériques

Elles étudient l'activité électrique du cœur dans le plan frontal
On a DI, DII, DIII et aVR, aVF, et aVL

On place **4 électrodes exploratrices** quand on enregistre un ECG mais on a que 3 électrodes efficaces, la 4^{ème} étant une **borne neutre** (elle stabilise l'enregistrement des courants induits)



Petit moyen mémo :

Le sang sur le bitume : **rouge** sur **noir**

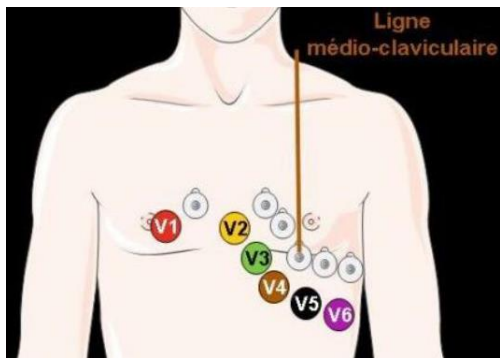
Le soleil sur la prairie : **jaune** sur **vert**.

Rouge à droite (right in english) : R de rouge avec R de right

III) Les dérivations précordiales

1) Définition

Les dérivations précordiales sont formées par l'électrode exploratrice qu'on a placée sur la poitrine (pas sur les membres), et par la borne centrale de Wilson qui représente la réunion des électrodes positives DI, DII, DIII



On va aussi utiliser un **galvanomètre** mais le principe de la **projection orthogonale d'un vecteur sur un axe n'est plus valable** car on est trop près du cœur.

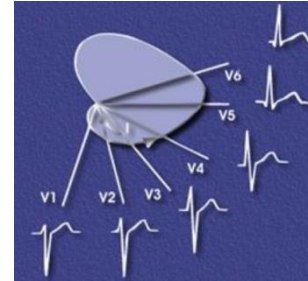
Ce qui est valable c'est qu'on considère le **front de dépolarisation**, la flèche du vectocardiogramme instantanée :

- Si la flèche **se rapproche** de l'électrode exploratrice: on aura une **déflexion positive**.
- Inversement, si la flèche **s'éloigne** de l'électrode on aura une **déflexion négative**

Plus il y a de cardiomyocytes qui se dépolarisent en face de l'électrode exploratrice, plus la déflexion dans le galvanomètre va être **de hauteur élevée**.

2) Bases de l'interprétation de l'ECG dans ces dérivations

Vectogramme dans le plan horizontal

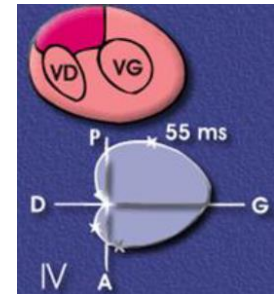


- En **V1**, on aura une **déflexion négative**: le front de dépolarisation s'éloigne de l'électrode exploratrice et augmente en intensité au fur et à mesure que la masse de cardiomyocytes qui se dépolarise est plus grande.
- En **V6**, une **déflexion positive**: on a un front de dépolarisation qui **arrive** vers l'électrode exploratrice

Dominance du ventricule gauche

L'intensité des courants induits est proportionnelle à la masse musculaire

Le ventricule gauche et le ventricule droit se dépolarisent en même temps, mais le VG est beaucoup plus important en masse que le VD. Le PA est alors dominé par le gauche.



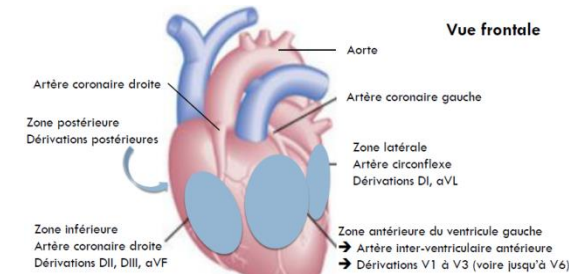
IV) Interprétation médicale de l'ECG

Il faut associer un électrocardiogramme à une maladie cardiaque par la **confrontation anatomo-clinique** : **mettre en relation les symptômes d'une personne malade avec les anomalies de tracé**

Regroupement des dérivations

Image ci-contre à titre d'exemple

Les dérivations se regroupent selon la vascularisation préférentielle d'un territoire myocardique par une **artère coronaire**.



Principaux renseignements médicaux tirés de l'ECG :

- ➔ Rythme et fréquence cardiaque
- ➔ Orientation de l'axe électrique du cœur dans la poitrine
- ➔ Qualité de perfusion du myocarde (ischémie-infarctus)
- ➔ Présence de certains troubles électrolytiques (kaliémie)
- ➔ Effet de certains médicaments (canaux ioniques)