

Potentiels d'action cardiaques

I) Propriétés électriques des cellules cardiaques

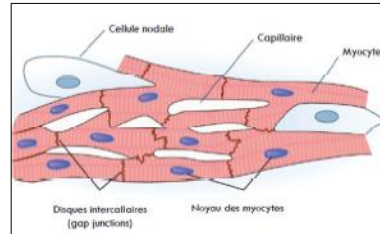
A chaque cycle cardiaque toutes les fibres se contractent ensemble de manière rythmique.

L'automatisme cardiaque est une propriété **intrinsèque** du cœur. Il n'est pas apportée au cœur grâce à une innervation par le SNC (transplantation possible).

Différents types de cellules cardiaques :

→ Les **cardiomyocytes** (reliés par des gap junctions)

→ Les **cellules nodales**

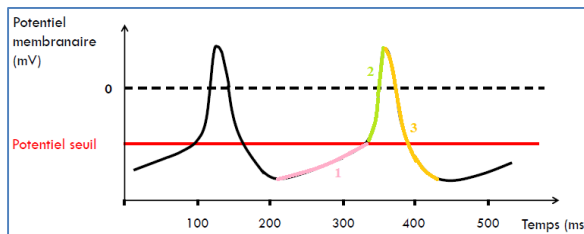


1) Cellules nodales

A) Nature des cellules nodales

- ✓ **Cellule pace maker** : Ouverture spontanée possible de canaux ioniques présents à la surface de sa membrane plasmique capable de générer un rythme.
Capacité de dépolarisation spontanée.
- ✓ **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 : $\approx 150\text{ms}$

Dépolarisation spontanée

2 : $\approx 50\text{ms}$

Potentiel d'action

3 : Repolarisation

- ✓ **Fréquence**: nombre de modifications électriques identiques par unité de temps (conditionné par différentes molécules, hormones...)

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

- ✓ **Rapide** dans le tissu nodal des **oreillettes** et des **ventricules**
- ✓ **Lente** dans le **nœud auriculo-ventriculaire** en ralentissant le PA, ça permet la dépolarisation complète des oreillettes avant celle des ventricules

→ **Cette vitesse variable du PA (plus rapide dans le tissu nodal que dans les cardiomyocytes) est essentielle à la synchronisation du cœur et permet la dépolarisation de l'ensemble des cardiomyocytes à chaque PA.**

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

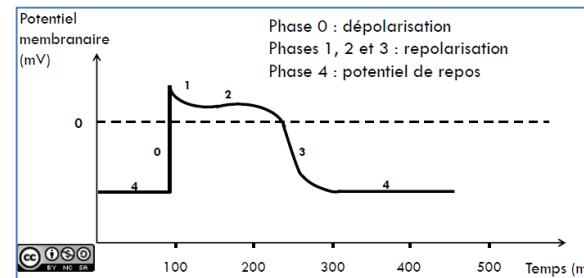
- ✓ La fréquence la plus élevée est celle du **nœud sino-auriculaire = pacemaker physiologique = 80bpm**
- ✓ De manière intermédiaire il y a la fréquence du **nœud auriculo-ventriculaire = 50bpm**
- ✓ La fréquence la moins élevée est celle des **fibres du réseau de Purkinje = 20bpm**

→ S'il y a interruption de la conduction du trajet du tissu nodal, le cœur bat à une fréquence inférieure au pace maker physiologique car le nœud qui reprendra le relai sera celui juste en aval de la lésion.

2) Cardiomyocytes

A) Propriétés des cardiomyocytes

1^{ère} propriété : « cellules excitables »



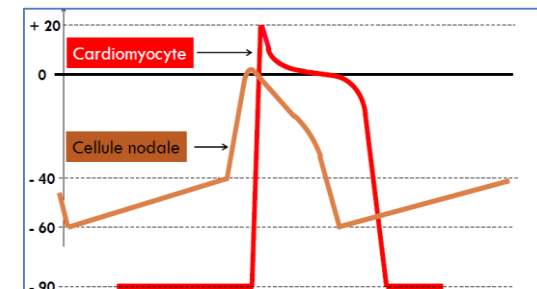
Elles n'ont aucun rythme propre et **dépendent entièrement du tissu nodal** pour se dépolariser. On parle de **couplage électrique**. (besoin de recevoir l'excitation du PA de la cellule nodale)

C) Propriétés des cellules nodales

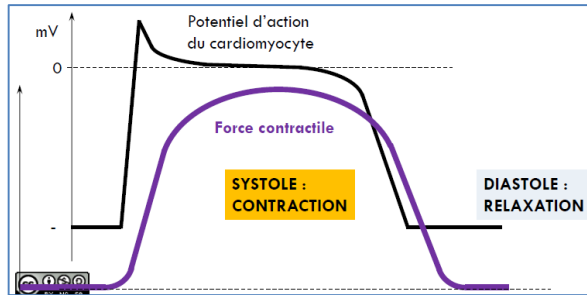
1^{ère} propriété « Rythme et fréquence »

- ✓ **Rythme**: succession de modifications électriques produites par l'ouverture spontanée de canaux ioniques. *Dépolarisation lente jusqu'au potentiel seuil → Potentiel d'action → repolarisation → période réfractaire → dépolarisation lente ...*

- 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.

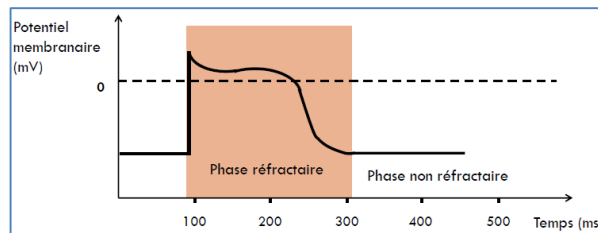


➔ **Il y a un couplage électrique entre les potentiels d'action des cellules nodales et des cardiomyocytes**



2^{ème} propriété : « cellules contractiles »

Le potentiel d'action correspond à la **contraction (systole)** et à la **relaxation (diastole)** du cardiomyocyte. Rapprochement des myofibrilles entre elles sous l'effet de l'entrée du Ca^{2+} et l'ATP.



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**.

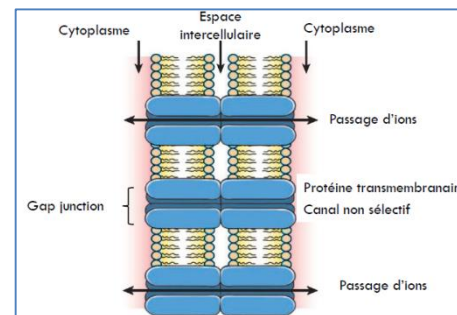
➔ **Conséquence : le myocyte se relaxe obligatoirement; la contraction permanente et soutenue du myocarde est impossible ➔ Tétanie impossible !**

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** créé par le PA est **continu grâce aux gap junctions**.

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



B) Squelette fibreux du cœur

Définition : Tissu fibreux rigide séparant les cardiomyocytes des oreillettes de ceux des ventricules permettant au tissu nodal d'être l'unique lien de conduction entre les deux parties du cœur.

Rôle mécanique : Insertion des valves cardiaques.

Rôle électrique :

- 1/ Le PA des cellules auriculaires ne parvient aux c 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 »

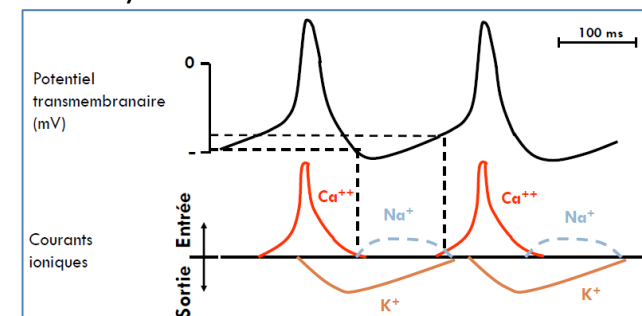
La **systole auriculaire précède la systole ventriculaire** : ce décalage temporel permet un remplissage optimal des ventricules et donc une optimisation du débit cardiaque.

3) Les canaux ioniques

Les canaux sont des cibles pour le SNV (régulation) et pour les médicaments.

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 (plus fort que le courant K⁺)**

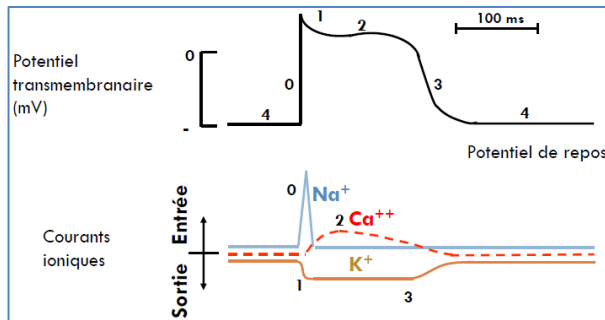
Potentiel d'action

Lorsqu'on arrive au potentiel seuil, **les canaux calciques** vont s'ouvrir (voltage-dépendants) Il y a une entrée de calcium dans le cytoplasme : **Phase de dépolarisation rapide**. Lorsque le potentiel atteint une valeur > 0 , 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⁺** toujours ouverts, Ouverture des **canaux calciques L**

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

Phase 4 : potentiel de repos

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 lente spontanée**.

b) Les canaux potassiques

Des cardiomyocytes

De plusieurs types, ils interviennent pendant les phases 1, 2 et 3 du PA

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.

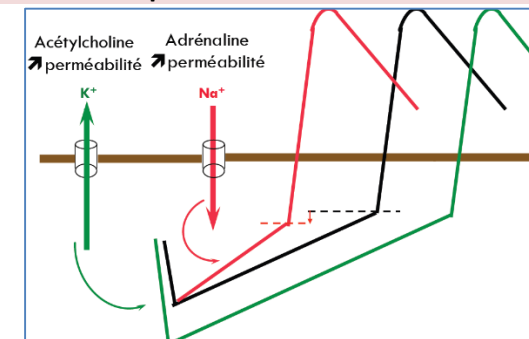
Des cellules nodales

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

Les inhibiteurs calciques diminuent leur perméabilité entraînant une diminution de la force contractile et une diminution de la fréquence cardiaque.

4) Application médicale

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



Adrénaline ➔ la **perméabilité du canal Na⁺** de type F, on va accélérer la dépolarisation : le seuil de dépolarisation est abaissé : cela provoque une ➔ de la **fréquence cardiaque (tachycardie)**.

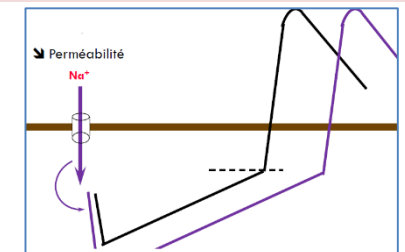
Nb : Elle ➔ aussi la perméabilité des canaux calciques ce qui va ➔ la force contractile.

Acétylcholine ➔ la **perméabilité des canaux K⁺**, le cytoplasme s'hyperpolarise (devient plus négatif), ça retarde l'atteinte du potentiel seuil de la cellule nodale. On abaisse le potentiel de repos sans modifier la pente de dépolarisation spontanée. On a une ➔ de la **fréquence cardiaque (bradycardie)**.

➔ **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

Ivabradine ➔ la **perméabilité du canal Na⁺**, on hyperpolarise la cellule qui va avoir un potentiel de repos plus bas. **Mdc de l'Insuffisance cardiaque.**
➔ On ➔ la **fréquence cardiaque (bradycardie)**, on augmente le temps de dépolarisation spontanée.



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 → fibrillation voire arrêt circulatoire.

→ **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)

Une petite variation de concentration de K⁺ extracellulaire modifie beaucoup la valeur du potentiel de repos.

II) Bases physiques de l'électrocardiogramme

1) Courants induits et galvanomètre

L'électrocardiogramme (ECG) est le tracé obtenu par l'enregistrement des courants osmotiques induits par l'activité du cœur à la surface de la peau.

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

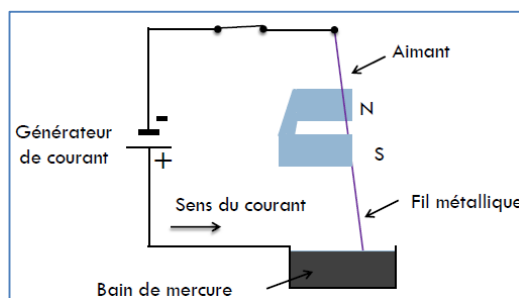
Loi d'ohm : Potentiel électrique = intensité du courant x résistances du circuit

B) Galvanomètre

L'appareil utilisé pour **mesurer l'intensité des courants induits** est un **galvanomètre**. Il 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, orientation de la déflexion) et l'**intensité** (importance de la déviation du fil, hauteur de la déflexion) 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 (c'est juste un type de galvanomètre).



2) Vecteur électrique unitaire

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

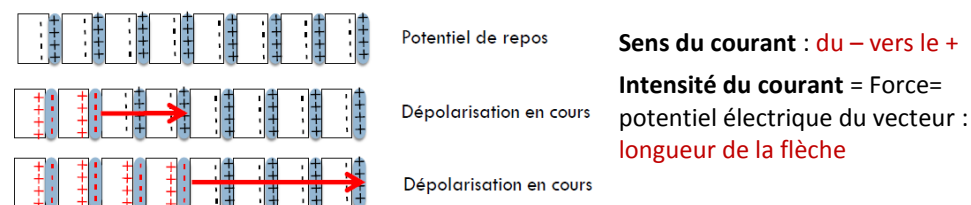
L'**orientation de la déflexion** de la corde du galvanomètre est **liée à l'orientation des potentiels d'action instantanés**

→ **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**.

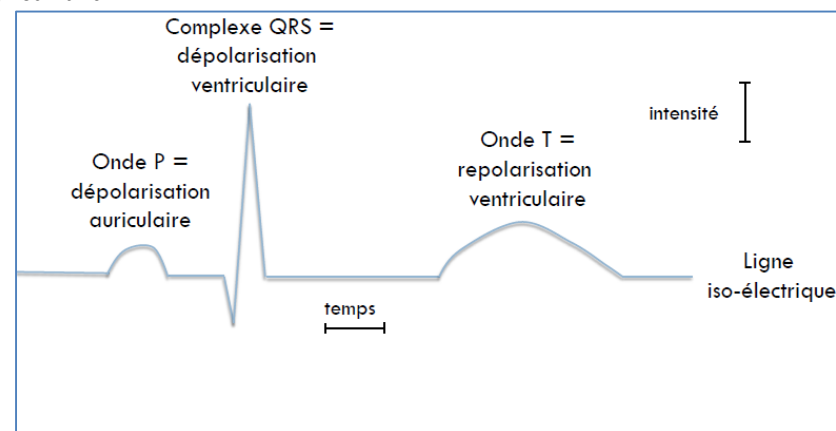
La hauteur et le sens des déflexions de la corde du galvanomètre donnent une **projection orthogonale** du vecteur électrique unitaire instantané sur la droite reliant 2 électrodes



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



duction ou vente est interdite.

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.

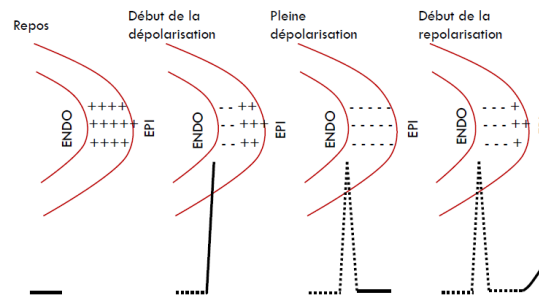
Intensité de QRS > intensité de P

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**.

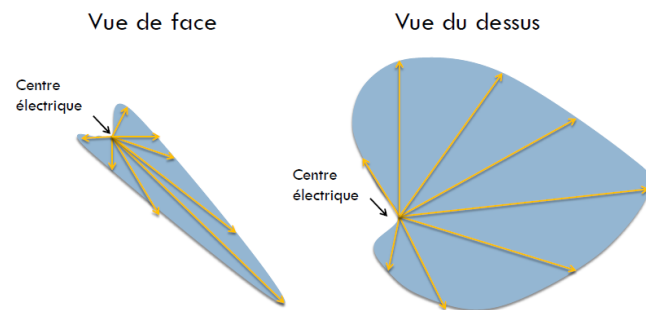
Les cellules de l'épicarde se repolarisent en premier.



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 dérivations : les côtés d'un triangle. Ces axes de projection, pour les vecteurs cardiaques unitaires, s'appellent des dérivations.

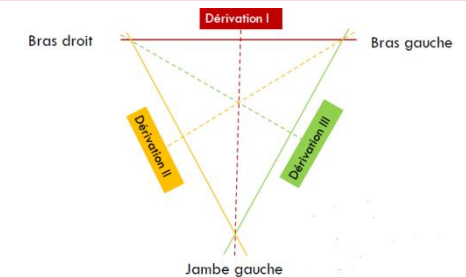
La **projection** orthogonale du vectocardiogramme sur une dérivation permet de mesurer le sens et l'intensité des courants induits.

Règle n°4 et ses conséquences

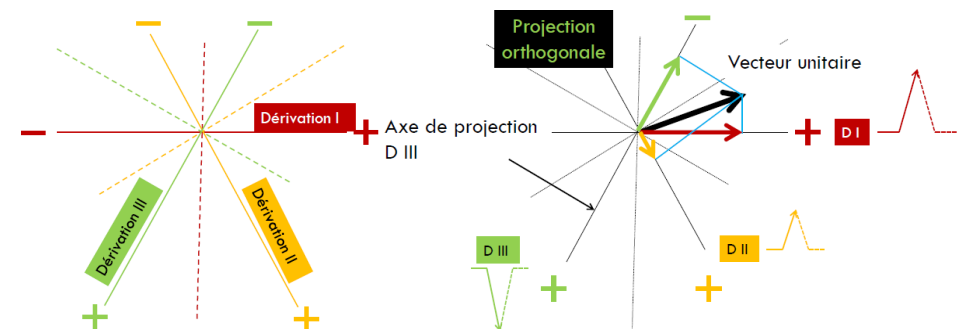
Einthoven a placés ces 3 dérivations de telle sorte qu'elles forment les 3 côtés d'un triangle équilatéral dont le centre géométrique est le centre électrique du cœur.

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.

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 la dérivation D3

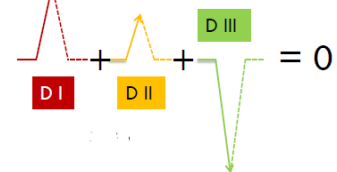
On a une flèche **verte** qui va du + vers le - : **on a un changement de sens du courant** (négatif ici) **L'intensité est forte** puisque la longueur de la flèche est assez longue par rapport au vecteur unitaire.

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.

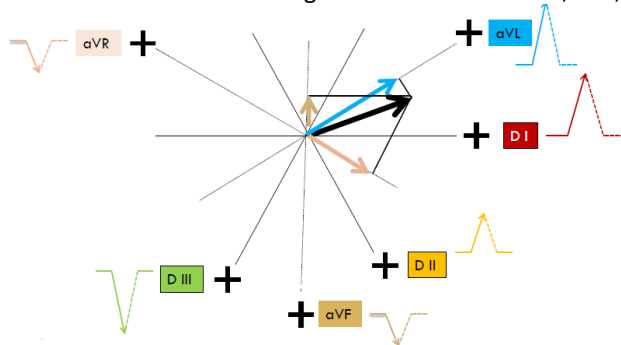
Dans un triangle équilatéral, la somme des projections orthogonales d'un vecteur sur les 3 côtés est toujours **nulle**.

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 dérivations supplémentaires

- ✓ **Einthoven** avait défini les dérivations **DI, DII, DIII** qui sont les côtés du triangle.
- ✓ **Bailey** réunit les 3 bissectrices du triangle : les dérivations **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 s'hypertrophie (à cause d'un rétrécissement d'une valve par ex) :

À droite : l'axe électrique du cœur va être dévié vers la droite.

À gauche : l'axe électrique du cœur va être dévié vers la gauche.

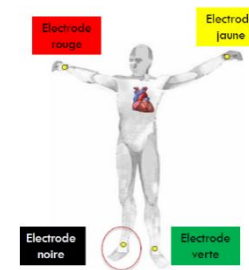
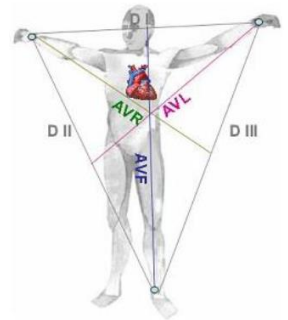
Si on a un infarctus, on aura une déviation de l'axe du cœur dans le **sens opposé**.

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 périphériques** 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 mais attention elle est quand même nécessaire à la réalisation de l'ECG).



Petit moyen mémo :

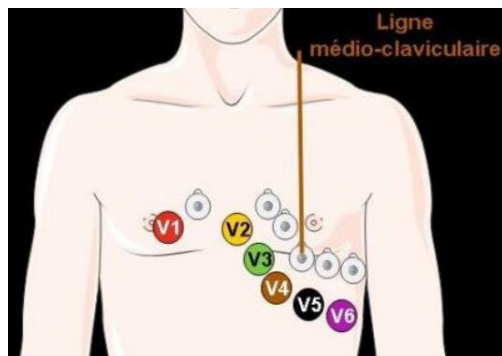
Le sang sur le bitume : **rouge** sur **noir**

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) Definition**

Les dérivations précordiales sont formées par une électrode exploratrice et l'électrode de référence.

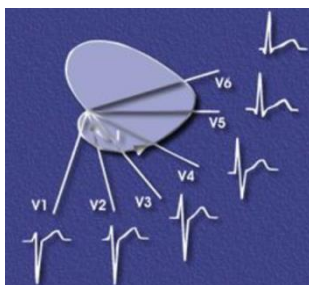


On va aussi utiliser un **galvanomètre** mais le **principe de la projection orthogonale d'un vecteur sur un axe n'est plus valable** car on est trop près du cœur.

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



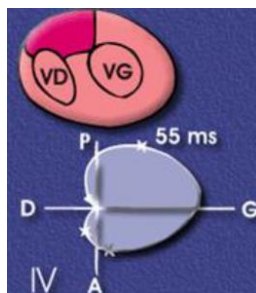
Vectogramme dans le plan horizontal

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 ECG à une maladie cardiaque par la **confrontation anatomo-clinique** :

- 1/ Tracés obtenus chez une personne en bonne santé → définition des tracés normaux
- 2/ Tracés obtenus chez un malade → relation symptômes / anomalies des tracés
- 3/ Tracés obtenus chez une personne malade qui décède → relation lésion anatomique (autopsie) / anomalies des tracés
- 4/ tracés obtenus après induction de lésions expérimentales chez l'animal de laboratoire → relation lésions induites / anomalies des tracés

Regroupement des dérivations

Toute électrode positive enregistre préférentiellement le fonctionnement du myocarde qu'elle regarde (qu'elle soit précordiale ou périphérique).

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

Un ECG nous renseigne sur : le **rythme** et la **fréquence** cardiaque, l'**orientation de l'axe** électrique du cœur, la **qualité de la perfusion** du myocarde, la présence de **désordres électrolytiques** et l'**efficacité d'un médicament** ou l'observance du patient.

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)