

ELECTROCARDIOGRAPHIE  
CHEZ LES  
ANIMAUX DOMESTIQUES

P.L. TOUTAIN

MAITRE-ASSISTANT

# S O M M A I R E

-----

	Page
DEFINITION - IMPORTANCE - HISTORIQUE.....	1
I - PRINCIPE DE L'ANALYSE VECTORIELLE.....	2
1. Généralités	
2. Les hypothèses d'EINTHOVEN	
2.1. Assimilation du coeur à un dipôle	
2.2. Le centre électrique du coeur	
2.3. Définition d'un triangle équilatéral	
2.4. Définition des 3 dérivation bipolaires	
2.5. Signification électrique des déviations du galvanomètre	
2.6. Résumé de la théorie d'EINTHOVEN	
II - PRESENTATION SUCCINCTE D'UN TRACE ELECTROCARDIOGRAPHIQUE TYPE.....	8
III - DEPOLARISATION ET REPOLARISATION CARDIAQUE CHEZ LES ANIMAUX.....	9
1. Activation ventriculaire	
1.1. Dépolarisation ventriculaire chez le chien	
1.2. Dépolarisation ventriculaire chez les ongulés	
2. Dépolarisation des oreillettes	
2.1. Cas général	
2.2. Cas particulier du cheval	
3. La repolarisation ventriculaire	
IV - DERIVATIONS ELECTROCARDIOGRAPHIQUES.....	14
1. Les dérivation standard	
1.1. Chez l'homme	
1.2. Problèmes posés par les animaux domestiques	
1.3. Insuffisance des dérivation standard	
1.4. Qualités d'un bon système de dérivation	
2. Dérivation bipolaires respectant les hypothèses de base	
2.1. Dérivation de DUBOIS	
2.2. Dérivation C E P B	
2.3. Dérivation orthogonales de HAMELIN et SMITH	
3. Dérivation unipolaires	
3.1. Dérivation unipolaires augmentées	
3.2. Dérivation unipolaires précordiales ou rapprochées	
V - L'AXE ELECTRIQUE DU COEUR.....	22
1. Définition	
2. Calculs pour un plan donné	
3. Valeurs de référence	
4. Déviations de l'axe électrique du coeur	
4.1. Physiologiques	
4.2. Pathologiques	

	Page
VI - LA VECTOCARDIOGRAPHIE.....	23
VII - LES ELECTROCARDIOGRAMMES CHEZ LES ANIMAUX DOMESTIQUES.....	23
1. L'auriculogramme	
2. Le ventriculogramme	
3. La repolarisation	
VIII - TECHNIQUES D'ENREGISTREMENT ET DE LECTURE DE TRACE ECG.....	26
IX - UTILISATION DE L'ELECTROCARDIOGRAPHIE.....	26
1. Physiologie du sport	
2. Sémiologie du coeur	

## L'ELECTROCARDIOGRAPHIE

-----

### D é f i n i t i o n

Le coeur est périodiquement le siège d'une activité électrique ; celle-ci est représentée par une onde de dépolarisation qui se propage depuis le noeud sinusal jusqu'à l'ensemble de la masse ventriculaire. L'électrocardiographie a pour objet d'enregistrer à partir d'électrodes superficielles les phénomènes électriques engendrés par le coeur au cours de sa révolution (dépolarisation, repolarisation). L'électrocardiogramme (ECG ou EKG) en est la traduction graphique.

### I m p o r t a n c e

L'exploration du champ électrique créé par le coeur au cours de sa révolution permet d'identifier la chronologie et la topographie de l'activité myocardique. A ce titre, l'électrocardiographie est employée à des fins sémiologiques. Pour reconnaître toute l'information contenue dans les tracés électrocardiographiques, il importe de maîtriser les différentes techniques et de se référer aux bases théoriques sur lesquelles elles s'appuient.

### H i s t o r i q u e

1876 - MAREY : Enregistrement avec un électromètre capillaire d'une activité électrique au niveau du coeur.

1889 - WALLER : Avec le même appareillage, enregistrement d'une activité électrique concomitante de la révolution cardiaque à partir d'électrodes périphériques ; c'est le premier enregistrement électrocardiographique.

1903 - EINTHOVEN : Introduction du galvanomètre à corde, instrument doué d'une faible inertie. Enoncé des principes généraux de l'électrocardiographie.

1920-1925 - LEWIS : Introduction de l'électrocardiographie en médecine humaine.

1922 - NÖRR : Introduction de l'électrocardiographie en médecine vétérinaire.

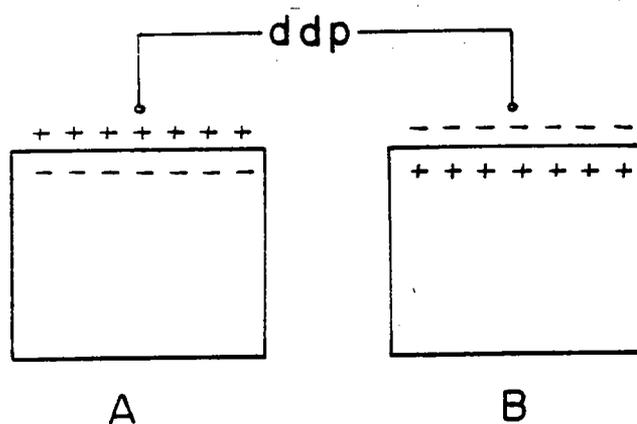
Jusque vers 1960, la plupart des méthodes proposées sont insatisfaisantes, car elles sont des transpositions mal comprises des dérivations utilisées chez l'homme. Les méthodes actuellement préconisées s'appuient sur les travaux de HAMLIN et SMITH (1960), Mac FEE (1961), DUBOIS (1961), SELLERS et al. (1958), HOLMES et DARKE (1970), BOUTTE (1964), COLLET (1972).

## I. - PRINCIPES DE L'ANALYSE VECTORIELLE

### 1. Généralités

Le coeur est placé dans la cage thoracique. Même les poumons qui sont remplis d'air et a fortiori tous les liquides conduisent l'électricité. Le coeur est donc situé dans un milieu conducteur (volume conducteur).

Au repos, les cellules cardiaques sont polarisées : positivement à l'extérieur, négativement à l'intérieur. Lorsque les cellules se dépolarisent, il y a inversion de la polarité (fig. 1). La cellule



cardiaque devient électro-négative à l'extérieur et électro-positive à l'intérieur. L'onde de dépolarisation, dans les conditions physiologiques, part toujours du noeud sinusal (entraîneur du coeur) pour descendre, selon un trajet déterminé, vers les ventricules. Au

Fig. 1. Polarité cellulaire.  
A. Cellule au repos - B. Cellule en activité.

cours de cette dépolarisation, la présence d'un ensemble de charges positives et de charges négatives crée un champ électrique ; l'exploration de ce champ électrique cardiaque est l'objet de l'électrocardiographie (fig. 2).

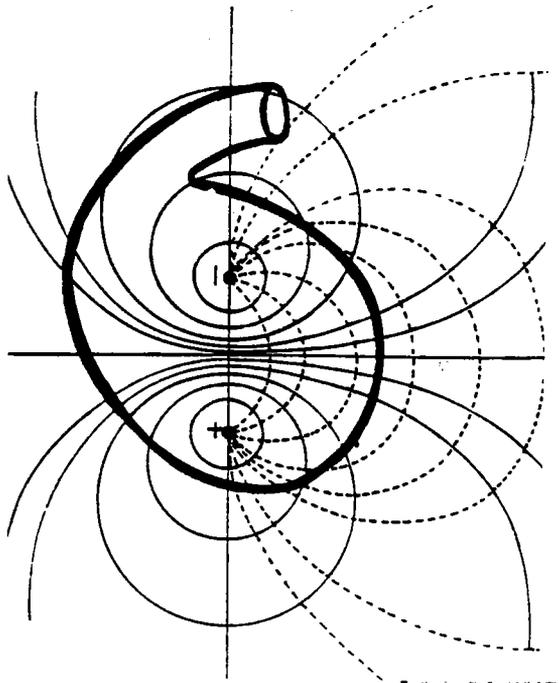


Fig. 2. Champ électrique créé par le coeur.

- Traits pleins : lignes équipotentiels
- Traits pointillés : lignes de force

L'interprétation des graphoéléments enregistrés repose sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices concernant la répartition et les variations dans le temps des sources de potentiels. Deux systèmes d'hypothèses sont actuellement retenus :

1) La théorie d'EINTHOVEN (dite du dipôle). Elle permet de comprendre la morphologie des ECG obtenus à partir d'électrodes situées à grande distance du coeur : dérivations\* D I, D II, D III, AVF, AVL, AVR.

2) La théorie de "l'angle solide" (dite des feuillets). Elle permet de comprendre la morphologie des ECG obtenus dans les dérivations précordiales, c'est-à-dire celles pour lesquelles les électrodes sont placées au voisinage du générateur cardiaque. Nous en reparlerons avec l'étude de ces dérivations.

## 2. Les hypothèses d'EINTHOVEN

### 2.1. Le coeur peut être assimilé à un dipôle

A chaque instant de l'activation cardiaque (auriculaire, ventriculaire), le potentiel crée en un point éloigné peut être assimilé à celui engendré par un dipôle\*\*.

Prenons pour exemple d'activation ventriculaire une onde de dépolarisation ayant envahi le septum et une partie des ventricules ; il existe alors un système de charges négatives au niveau du septum et du myocarde adjacent et de charges positives dans le reste du myocarde. On peut résumer cette répartition de charges par un dipôle, c'est-à-dire une charge positive et une charge négative. Ce dipôle est représenté par un vecteur de module approprié.

\* On appelle dérivation en électrocardiographie les différences de potentiels enregistrées entre 2 électrodes placées sur le corps.

\*\* Les quelques rappels de physique nécessaires à la compréhension des principes de base de l'électrocardiographie devront être revus dans les livres spécialisés.

De façon générale, il existe à tout moment de la dépolarisation un vecteur somme capable de représenter le coeur : il est dirigé des charges négatives vers les charges positives. Son module est proportionnel aux charges en présence (fig. 3).

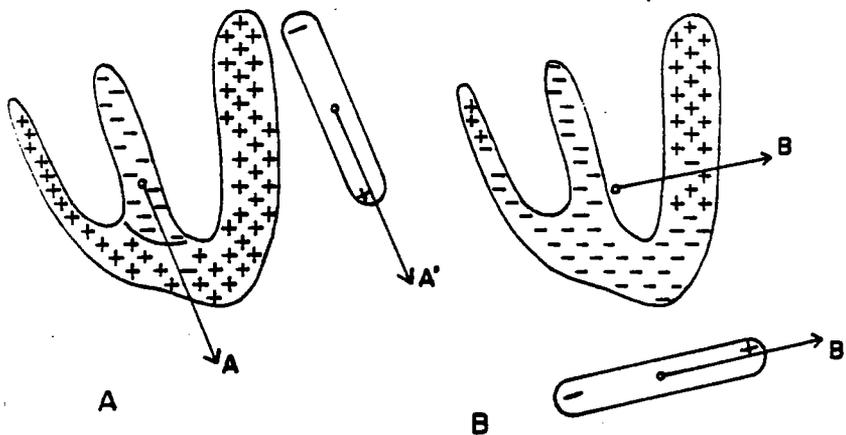


Fig. 3. Représentation d'un système de charges cardiaques par un vecteur dipôle.

## 2.2. Le centre électrique du coeur et vectocardiogramme

L'origine des vecteurs dipôles successifs varie au cours du temps. Pour des raisons de simplicité, on place les différentes origines des vecteurs dipôles en un même point que l'on nomme le centre électrique du coeur. Dans ces conditions, l'extrémité libre du vecteur dipôle cardiaque décrira au cours du temps une courbe fermée et gauche que l'on nomme le vectocardiogramme (fig. 4).

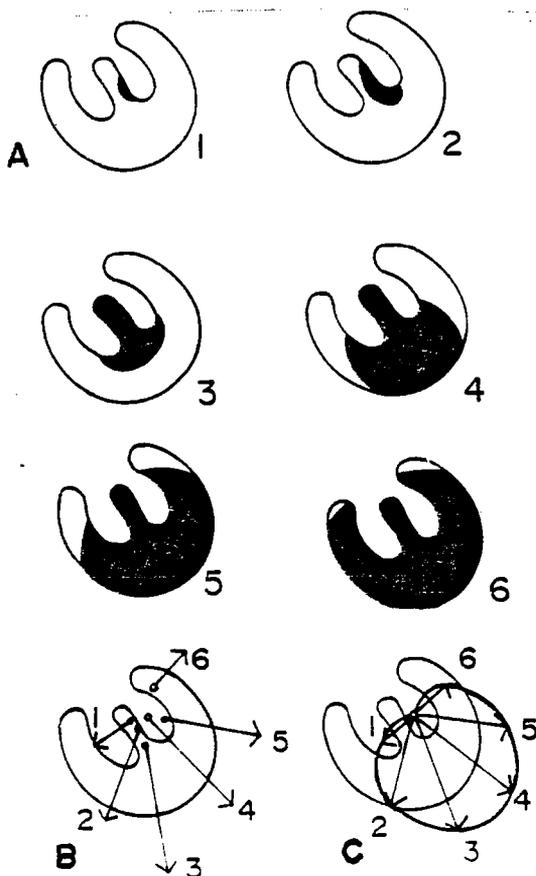


Fig. 4. Centre électrique du coeur et vectocardiogramme ventriculaire.

A. Six principaux temps de la dépolarisation ventriculaire.  
En noir : les zones électronegatives, c'est-à-dire dépolarisées.  
En blanc : les zones électropositives, c'est-à-dire au repos.

B. Représentation des 6 temps précédents par leur vecteur dipôle réel.

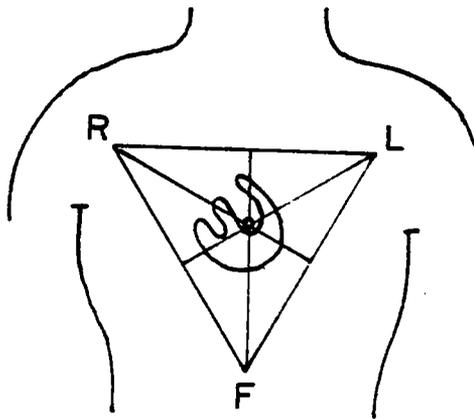
C. L'origine des 6 vecteurs dipôles a été placée en un point moyen nommé le centre électrique du coeur ; l'extrémité libre des vecteurs successifs décrit une courbe fermée nommée vectocardiogramme ventriculaire.

### 2.3 Définition d'un triangle équilatéral

A - Le coeur est assimilé à un dipôle ; celui-ci engendre un champ électrique ayant une configuration spatiale et temporelle définie par les modalités de la dépolarisation cardiaque. Pour explorer ce champ et, partant, pour étudier la dépolarisation cardiaque, on enregistre avec un galvanomètre les différences de potentiel existant entre 3 points remarquables du champ.

Les 3 points retenus pour placer les électrodes sont tels

- (1) qu'ils soient le plus éloignés possible du coeur,
- (2) qu'ils forment un triangle équilatéral (choisi pour ses propriétés géométriques),
- (3) que le centre de gravité du triangle équilatéral corresponde au centre électrique du coeur (point zéro).



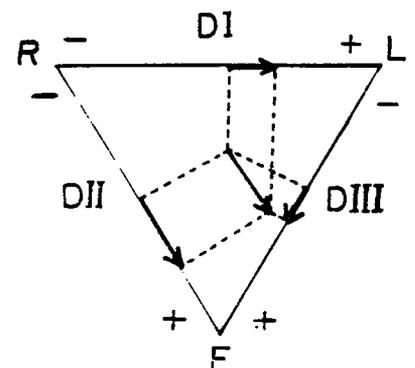
*Fig. 5. Définition d'un triangle équilatéral chez l'homme.*

On y parvient chez l'homme en plaçant les électrodes sur l'épaule droite (point R)\*, l'épaule gauche (point L) et sur le bas-ventre (point F). En pratique, les électrodes sont placées sur les poignets gauche et droit et sur la jambe gauche. On assimile alors les membres à de simples fils conducteurs (fig. 5).

### 2.4 Définition des 3 dérivations bipolaires

Par définition, on nomme D I la dérivation prise entre R et L en plaçant le pôle négatif du galvanomètre sur R ; D II la dérivation prise entre R et F en plaçant le pôle négatif du galvanomètre en R et D III la dérivation prise entre L et F avec L pour pôle négatif. Ce sont les 3 dérivations standard encore dites frontales chez l'homme.

L'activité du coeur sera donc désormais représentée par un vecteur ayant pour origine le centre de gravité du triangle équilatéral. On enregistrera avec un galvanomètre pour chacune des dérivations précitées une différence de potentiel proportionnelle à la projection de ce vecteur sur les côtés du triangle équilatéral (fig. 6).



*Fig. 6. Définition des 3 dérivations standard bipolaires.*

\* initiales des mots anglais Right (droite), Left (gauche), Foot (pied)

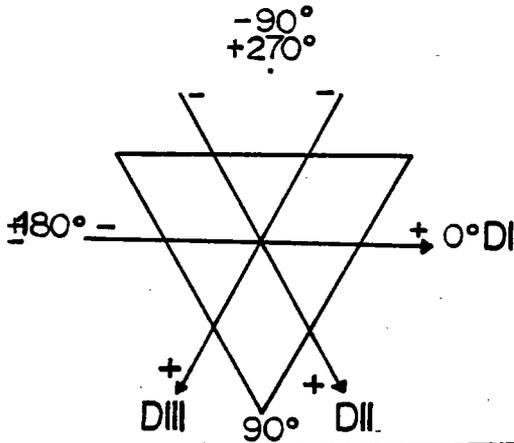


Fig. 7. Remplacement du triangle par un triaxe équivalent.

Pour faciliter la représentation du vecteur, on le projette sur un triaxe obtenu par une simple translation des côtés du triangle ; ce triaxe est gradué, le 0° correspondant à l'horizontale gauche (fig. 7).

### 2.5. Signification électrique des dérivations du galvanomètre

L'électrocardiogramme est un simple galvanomètre. Par convention, les déflexions des galvanomètres sont dites positives lorsqu'elles sont au-dessus de la ligne iso-électrique. Ces déflexions sont obtenues pour un sens particulier d'écoulement du courant dans l'appareil. On reconnaît donc à un galvanomètre une borne positive et une borne négative (pour que les déflexions les plus amples soient positives, on a adopté, chez l'homme, les conventions de signes énoncées au § 2.4.). Il en résulte que l'appareil enregistre une déflexion positive lorsque la projection du vecteur dipôle est dirigée vers le pôle positif et une déflexion négative lorsque la projection de ce vecteur s'éloigne du pôle positif.

Ces notions et conventions sont illustrées par la figure 8.

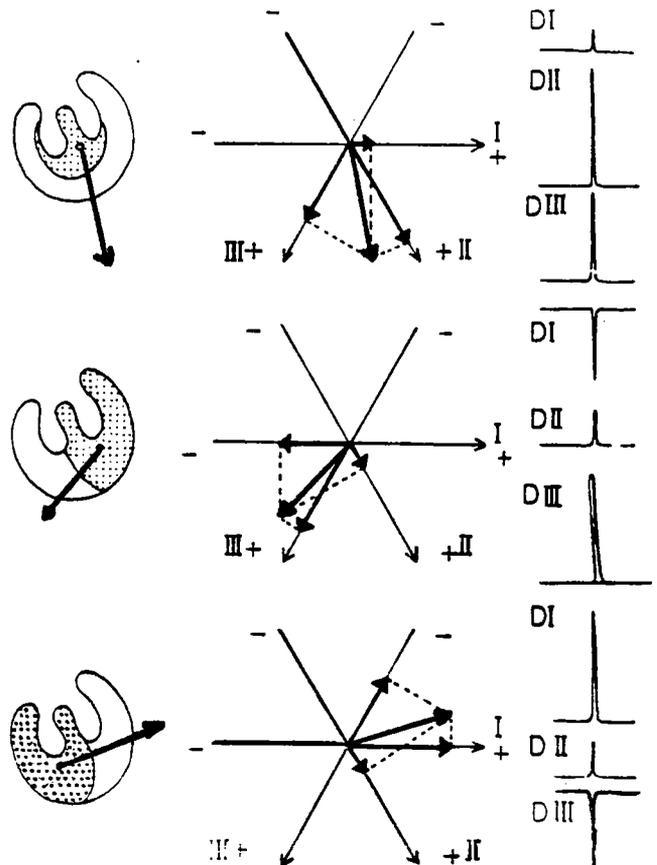
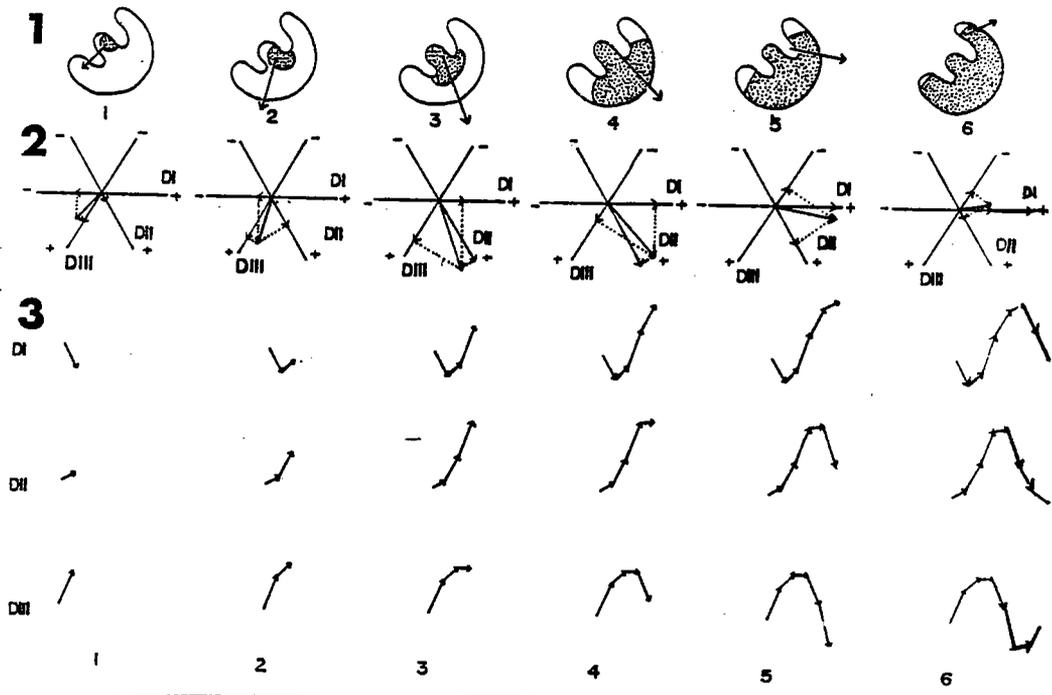


Fig. 8. Représentation sur un triaxe de 3 vecteurs dipôles de dépolarisation ventriculaire avec leur traduction électrocardiographique.

A partir des trois exemples présentés, on comprend que les variations de potentiels recueillies au niveau des électrodes, c'est-à-dire la morphologie de l'ECG, sera directement fonction du schéma de dépolarisation cardiaque. Inversement, ce schéma de dépolarisation pourra être déduit des caractéristiques des tracés obtenus en D I, D II, D III. La figure 9 illustre la formation du complexe QRS.



*Fig. 9. Application de la théorie vectorielle à la formation du complexe QRS.*

1. Différentes étapes de la dépolarisation du ventricule.
2. Décomposition du vecteur dipôle résultant sur chacune des 3 dérivations.
3. Représentation graphique pour chacune des 3 dérivations des vecteurs dipôles.

## 2.6. Résumé de la théorie d'EINTHOVEN

L'auteur assimile le corps à un plan conducteur ayant la forme d'un triangle équilatéral. Il place au milieu de ce triangle les dipôles représentant à tout moment le coeur, générateur de forces électromotrices. Les dipôles sont à l'origine des différences de potentiels. Lorsque ces dernières sont enregistrées sur les sommets du triangle équilatéral, elles sont :

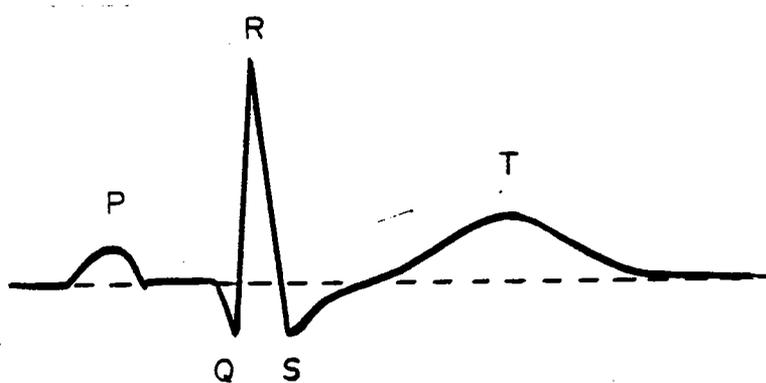
- (1) proportionnelles au module du dipôle,
- (2) proportionnelles au cosinus de l'angle alpha que fait l'axe du dipôle avec le côté de projection du triangle,

(3) inversement proportionnelles au carré de la distance entre les dipôles et le galvanomètre,

(4) par définition,  $D I + D III = D II$

A partir des différences de potentiels enregistrées entre les sommets du triangle, on peut construire un vecteur dipôle cardiaque et, partant, apprécier le schéma de dépolarisation cardiaque.

## II - PRESENTATION SUCCINCTE D'UN TRACE ELECTROCARDIOGRAPHIQUE TYPE



*Fig. 10. Electrocardiogramme type D II chez l'homme (dérivation standard).*

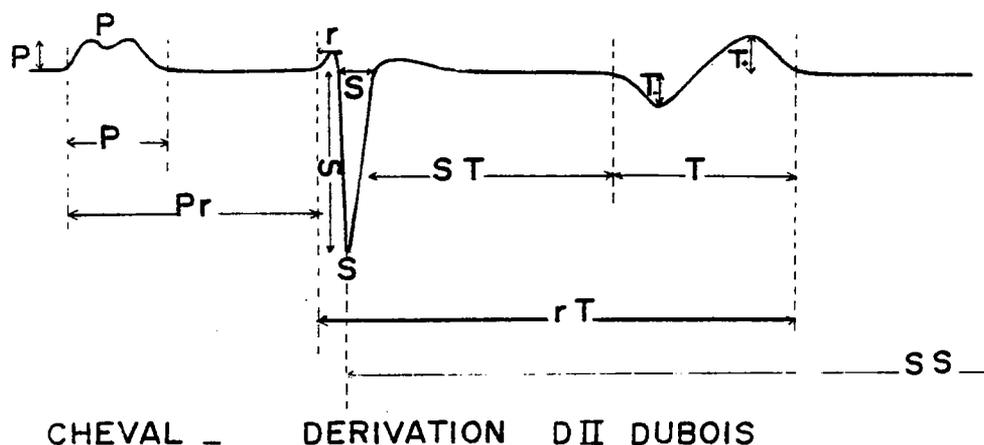
A partir des considérations précédentes, on peut aisément comprendre l'origine de la morphologie d'un tracé électrocardiographique type D II chez l'homme (fig. 10) ; celui-ci est formé par des ondes et des segments qui sont repérés par des lettres :

P, Q, R, S et T (choisies par EINTHOVEN parce qu'elles étaient encore libre dans le vocabulaire des physiologistes).

- (1) La première onde ou auriculogramme est dite P. Elle correspond à la dépolarisation des oreillettes à partir de l'activation née au noeud sinusal.
- (2) La 2e onde est un complexe décrit par les lettres QRS. Elle est en relation avec la dépolarisation du septum et des ventricules (ventriculogramme).
- (3) La 3e onde, T, traduit la restauration ventriculaire (la repolarisation auriculaire étant masquée électriquement par la dépolarisation ventriculaire).
- (4) Le segment PR est le temps de passage de l'activation de l'oreillette au noeud auriculo-ventriculaire (NAV).

Quelles que soient la position des électrodes et l'espèce à laquelle on s'adresse, on retrouve une onde P, un complexe QRS et une onde T.

Cependant, la morphologie, le sens et l'amplitude des ondes sont très différents. La figure 11 donne l'exemple d'un ECG (dérivation D II de DUBOIS) chez le cheval. Ces différences résultent (i) des schémas de dépolarisation du coeur qui présentent des particularités spécifiques ; (ii) du choix d'un système de dérivation.



*Fig. 11. Electrocardiogramme type D II chez le cheval (dérivation de Dubois).*

### III - SCHEMAS DE DEPOLARISATION ET DE REPOLARISATION CHEZ LES ANIMAUX

#### DOMESTIQUES

##### 1. Dépolarisation ventriculaire

On classe les espèces animales en 2 groupes selon leur schéma de dépolarisation ventriculaire :

- 1) Chien - Chat - Rongeurs - Primates
- 2) Cheval - Porc - Moutons - Bovins

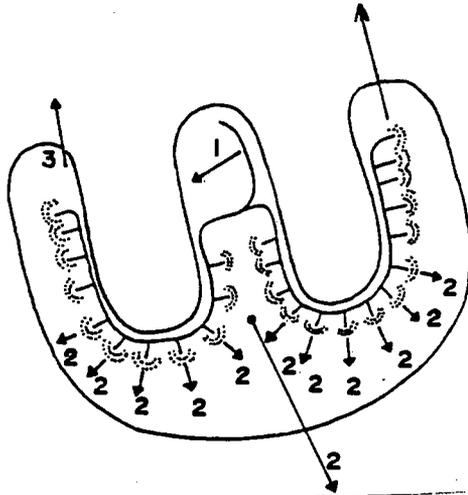
La différence entre les 2 groupes repose sur l'existence d'un réseau de PURKINJE très développé chez les ongulés.

##### 1.1. Dépolarisation ventriculaire chez le chien

L'onde de dépolarisation, après avoir traversé le noeud auriculo-ventriculaire, gagne le faisceau de HIS par ses branche gauche et droite. La vitesse de dépolarisation dans le tissu nodal est rapide (1 500 mm/s), si on la compare à celle du myocarde (300 à 800 mm/s). Il en résulte que toute la masse des 2 ventricules va se contracter simultanément. On doit

remarquer que la dépolarisation au niveau du tissu nodal n'entraîne aucun signal au niveau de l'ECG. Seule la propagation de fibre à fibre dans le myocarde est à l'origine d'un signal électrocardiographique.

La première région concernée par la dépolarisation de fibre à fibre est le septum inter-ventriculaire. Le vecteur dominant est dirigé à droite (vecteur 1) (fig. 12 et 13).

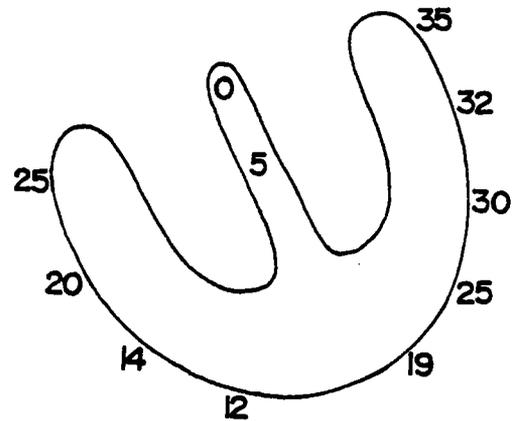


*Fig. 12. Schéma de dépolarisation du ventricule chez le chien.*

- Vecteur 1 : dépolarisation du septum se faisant de gauche à droite

- Vecteur 2 : dépolarisation des parois ventriculaires depuis l'endocarde vers l'épicarde

- Vecteur 3 : dépolarisation de la base du cœur.



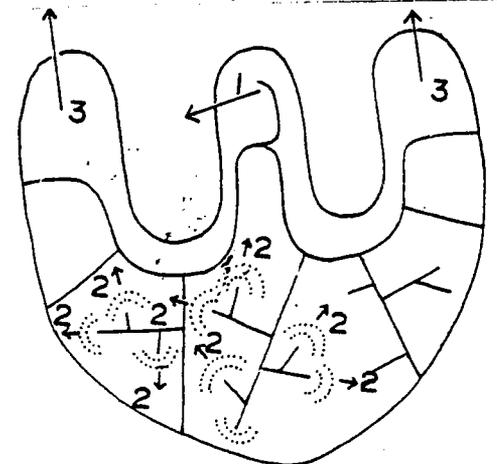
*Fig. 13. Chronologie de la dépolarisation ventriculaire chez le chien.*

Les nombres indiquent en ms les temps de dépolarisation.

Le 2e temps de la dépolarisation concerne les parois des ventricules depuis l'endocarde jusqu'à l'épicarde. Cette dépolarisation se fait à peu près simultanément dans les 2 ventricules. Cependant, le vecteur résultant sera dirigé vers la gauche car la paroi ventriculaire gauche est de 4 à 6 fois plus épaisse (vecteur 2, durée 0,025 s). Le 3e vecteur traduit la fin de la dépolarisation du cœur dans sa région basale ; elle se fait selon une direction apico-basilaire (durée 0,01 s).

### 1.2. Dépolarisation ventriculaire chez les ongulés

La dépolarisation du ventricule chez les ongulés présente un caractère spécifique (fig. 14). Si les vecteurs



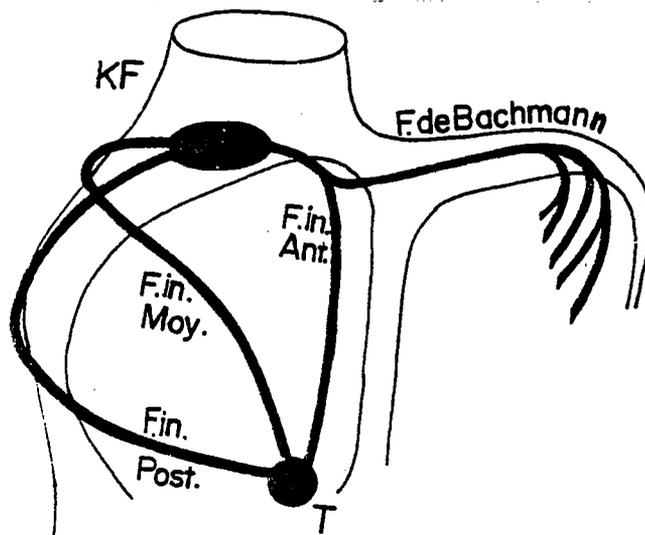
*Fig. 14. Schéma de dépolarisation ventriculaire chez les ongulés.*

1 et 3 sont retrouvés, le 2e vecteur est nul. Cela est dû à un réseau de PURKINJE traversant complètement la masse ventriculaire et irradiant dans toutes les directions. La dépolarisation se faisant à partir des extrémités libres du réseau de PURKINJE, c'est-à-dire sans direction préférentielle, le vecteur somme sera nul. Cela veut dire que la dépolarisation des parois ventriculaires ne participe pas à la formation du complexe QRS.

Résumé : Le principal vecteur ventriculaire chez les ongulés est celui qui traduit la dépolarisation de la base du coeur (vecteur 3) alors que chez le chien et l'homme, le vecteur le plus important correspond à la dépolarisation de la masse ventriculaire depuis l'endocarde jusqu'à l'épicarde (vecteur 2). Cela explique que pour un même système de dérivation le sens de QRS soit différent pour les 2 groupes d'animaux.

## 2. Dépolarisation des oreillettes

### 2.1. Cas général

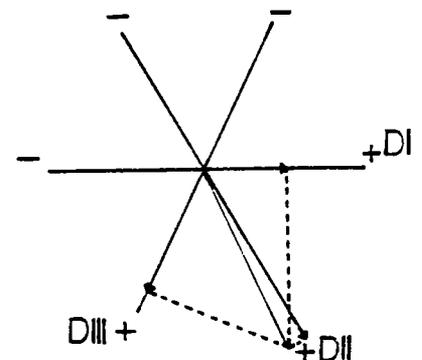
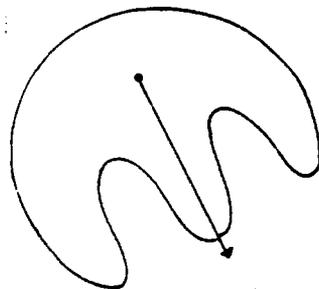


*Fig. 15. Voies d'activation préférentielle dans les oreillettes.*

*KF : noeud sinusal  
FI : faisceaux inter-nodaux*

*Le F. de Bachmann assure la propagation de l'onde de dépolarisation vers l'oreillette gauche.*

Pour la plupart des espèces (chien, homme, bovins), la dépolarisation se fait de façon radiaire à partir du noeud sinusal. La vitesse de dépolarisation est lente (1 m/s) car il n'y a pas de véritable tissu nodal.



*Fig. 16. Dépolarisation des oreillettes.*

*- à gauche, vecteur dipôle  
- à droite, décomposition sur les 3 dérivations standard.*



Pour une même dérivation, l'onde P présente des morphologies très variables (ondes diphasiques ++, --). Cela tient au fait que, selon l'animal, son tonus végétatif, son équilibre humoral, le noeud sinusal n'est pas toujours l'entraîneur. On parle dans ces conditions d'entraîneur itinérant (wandering pacemaker des Anglo-Saxons). C'est ainsi que chez les chevaux au tonus vagal élevé, l'entraîneur du coeur est souvent localisé dans le sinus coronaire (tiers caudal de l'oreillette droite) fig. 17 et 18).

### 3. La repolarisation ventriculaire\*

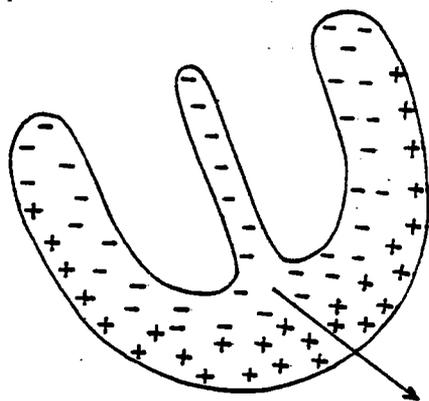


Fig. 19. Repolarisation ventriculaire.

et T auront des sens différents chez les ongulés. On explique ce schéma de repolarisation commençant par l'apex par l'irrigation réduite du septum au cours de la systole.

(2) Chez le cheval, après l'exercice (ou encore dans l'hyperthermie, l'hypoxie, des conditions électrolytiques défavorables, les émotions), on assiste à une inversion de l'onde T, c'est-à-dire que celle-ci devient de même sens que le complexe QRS. Cette inversion, parfaitement physiologique chez le cheval après l'effort, reste mal expliquée quant à son mécanisme. Elle est l'un des critères utilisés pour apprécier les performances sportives chez le cheval.

---

\* La repolarisation auriculaire est masquée électriquement par le ventriculogramme

(1) La repolarisation ne commence pas dans le septum, mais plutôt par l'apex. Elle se fait de l'épicarde vers l'endocarde. Le vecteur de repolarisation sera dirigé de façon prédominante de la base à l'apex (fig. 19). Il en résulte que chez les animaux du 1er groupe, QRS et T auront toujours le même sens alors que QRS

## IV - LES DERIVATIONS ELECTROCARDIOGRAPHIQUES

### 1. Les dérivations standard

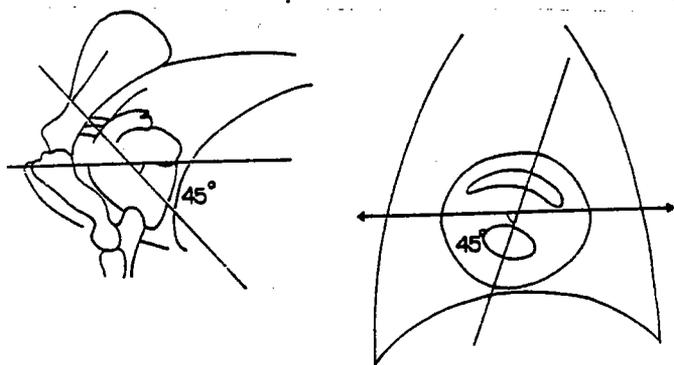
1.1. Chez l'homme, l'emplacement des électrodes est défini par un triangle d'exploration dont le coeur occupe le centre. C'est pourquoi en médecine vétérinaire on a dans un premier temps transposé ce qui était utilisé chez l'homme. Rappelons que ce triangle avait été choisi par EINTHOVEN pour les raisons suivantes :

- a) le coeur est au centre,
- b) le triangle est grand par rapport au coeur,
- c) le plan du triangle est perpendiculaire au septum, les 2 côtés du triangle étant face aux ventricules,
- d) l'un des côtés est à peu près parallèle à l'axe électrique moyen,
- e) les électrodes sont placées sur les membres car les potentiels ainsi recueillis sont identiques à ceux qui le sont au niveau des racines.

### 1.2. Problèmes posés par les animaux domestiques

Les particularités anatomiques des animaux domestiques font que les dérivations des membres ne définissent pas un triangle équilatéral dont le centre serait occupé par le coeur :

- a) la cage thoracique est aplatie latéralement et non de façon antéro-postérieure ;
- b) la ligne des épaules chez l'homme définissant la dérivation, D I passe nettement au-dessus du coeur ; chez les animaux,



*Fig. 20. Position du coeur chez les quadrupèdes*

- Le coeur est incliné selon une direction céphalo-caudale faisant un angle de  $45^\circ$  avec l'horizontale (figure gauche).

- Le coeur a subi une rotation de  $45^\circ$  par rapport à une direction transversale (figure droite).

les épaules sont situées dans des plans différents, le coeur placé dans un plan intermédiaire est traversé par la ligne des épaules ;

c) à l'intérieur de la cage thoracique, le coeur a subi une rotation telle que le coeur droit chez l'homme devient le coeur antérieur chez les animaux et le coeur gauche le coeur postérieur ;

d) le septum est dans un plan faisant un angle de  $45^\circ$  degrés avec le plan sagittal et un angle de  $45^\circ$  degrés avec le plan ventral (fig. 20).

### 1.3. Insuffisance des dérivations standard chez les animaux domestiques

Plaçons les électrodes sur les membres ; contrairement à ce qui est défini chez l'homme, où la jonction scapulo-humorale est peu étendue, cette zone est mal précisée chez le chien. Prenons arbitrairement comme points R et L les articulations scapulo-humorales et l'articulation coxo-fémorale gauche pour point F.

On constate que le triangle ainsi défini ne respecte pas les conditions invoquées par EINTHOVEN (fig. 21) :

- le triangle n'est pas équilatéral ;
- le coeur n'est pas au centre du triangle ;
- le plan du triangle n'est pas perpendiculaire au septum cardiaque, donc D II et D III feront face aussi bien au ventricule gauche qu'au ventricule droit (rotation du coeur de 45°) ;
- l'axe électrique moyen ne passe pas dans le plan du triangle (inclinaison du coeur à 45°).

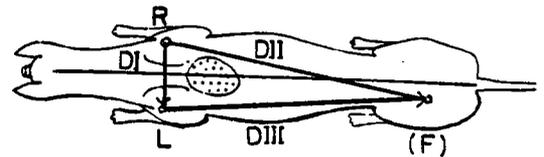
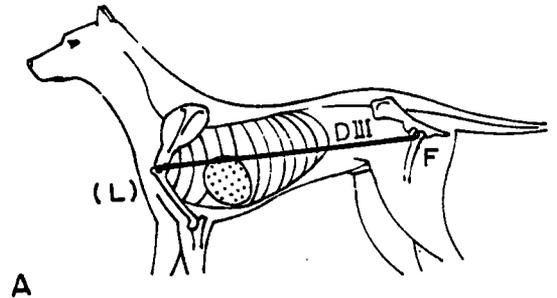


Fig. 21. *Dérivations standard chez le chien.*

Il résulte de cette mauvaise définition du triangle que :

- a) La morphologie sera inconstante d'un sujet à l'autre et pour un même sujet au cours d'une même séance (un déplacement d'un membre antérieur modifie le tracé).
- b) L'amplitude des complexes QRS sera toujours très faible ( $< 0,05$  mV).
- c) L'équation fondamentale d'EINTHOVEN ( $D_1 + D_3 = D_2$ ) n'est jamais vérifiée. Il est impossible de construire l'axe électrique du coeur.
- d) On rencontre fréquemment des ventriculogrammes atypiques (trapézoïdaux).
- e) Il sera difficile d'identifier de façon univoque les troubles ventriculaires.

### 1.4. Qualités recherchées pour un bon système de dérivation

- Triangle approximativement équilatéral et facile à déterminer, c'est-à-dire défini par des repères anatomiques précis.
- Triangles contenant la totalité du coeur pour que soit vérifiée l'équation d'EINTHOVEN.

— Les voltages enregistrés doivent être importants, c'est-à-dire que le plan du triangle doit être le plus voisin possible de celui des vecteurs dipôles.

— Eviter la redondance des informations.

— Obtention de tracés ayant un grand degré de constance.

— Un faible déplacement de l'électrode ne doit pas modifier le tracé.

## 2. Les systèmes de dérivations bipolaires respectant les hypothèses de base

Plusieurs systèmes d'exploration sont actuellement utilisés. Inspirés par des considérations anatomo-physiologiques, et non par des raisons anthropocentriques, ils respectent les principes de base de l'électrocardiographie. Nous allons présenter 3 systèmes couramment utilisés.

### 2.1. Dérivations de DUBOIS (1961) (utilisées à l'E.N.Y.T.)

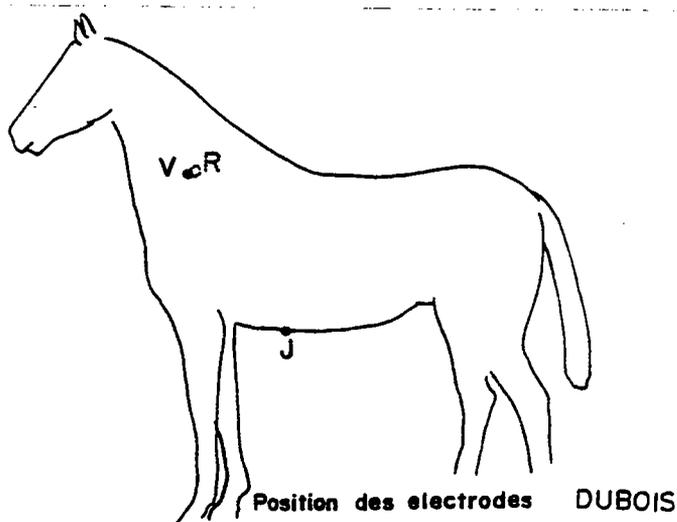
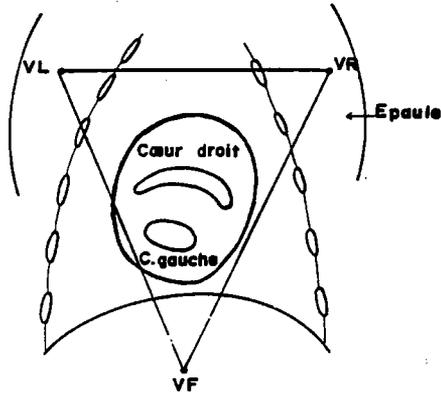


Fig. 22. Emplacement des électrodes pour obtenir les dérivations de DUBOIS.

*De façon conventionnelle, on place l'électrode verte (V) à gauche, l'électrode rouge (R) à droite et l'électrode jaune (J) sur la zone rétro-xyphoïdienne.*

Le triangle d'exploration proposé par DUBOIS est délimité par les 3 points suivants : bord antérieur de l'épaule à mi-distance du garrot et de la pointe de l'épaule gauche (L) et droite (R), zone rétro-xyphoïdienne (F) ; l'électrode indifférente est posée sur la queue (fig. 22).

Dans ces conditions, le coeur est approximativement au centre d'un triangle dont le plan passe par l'axe sagittal. Ce plan est incliné de bas en haut et d'arrière en avant (fig. 23 et 24).



Triangle obtenu avec les  
dérivations de DUBOIS

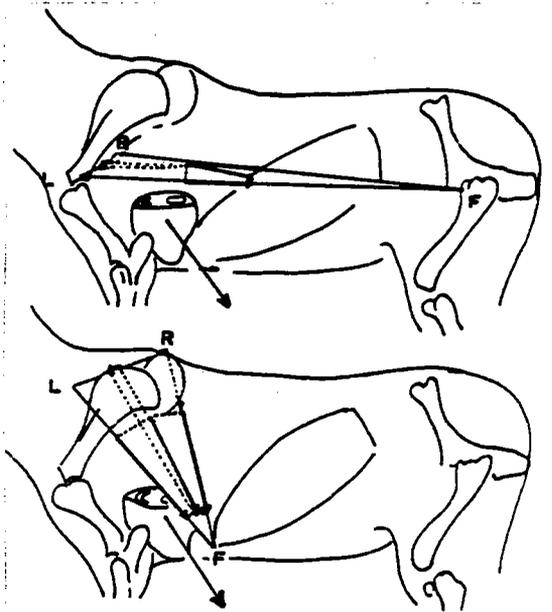
Fig. 23. Vue superficielle du triangle obtenu avec les dérivations de Dubois.

Le coeur est approximativement au centre d'un triangle (qui n'est pas équilatéral).

Fig. 24. Comparaison des triangles obtenus avec les dérivations standard (schéma supérieur) et les dérivations de Dubois (schéma inférieur).

Pour le triangle de Dubois, on remarquera (1) qu'il se rapproche d'un triangle équilatéral ; (2) que son inclinaison le rend parallèle aux principaux vecteurs (2 chez le chien, 3 chez le cheval).

Il en résulte que leur décomposition donnera naissance à des déflexions amples si on les compare à celles obtenues avec des dérivations standard ; pour ces dernières, c'est la projection du vecteur sur le triangle qui sera décomposée sur chacun des 3 côtés.



On peut alors montrer que :

- l'équation d'EINTHOVEN est presque toujours vérifiée,
- un léger déplacement de l'électrode ne modifie pas le tracé,
- les déflexions ont un important voltage,
- un mouvement des membres ne modifie pas le tracé.

On reproche à ce système d'être peu informatif (le tracé D I est iso-électrique, D II et D III sont redondants) et de n'apprécier les différents vecteurs que dans la direction cranio-caudale.

## 2.2. Dérivations C E P B

(Centre d'Étude et de Production Biologiques du Service  
Biologique et Vétérinaire des Armées)

Définition : R correspond à l'apophyse trachélienne du sternum ; L est en arrière du garrot et F sur le sternum.

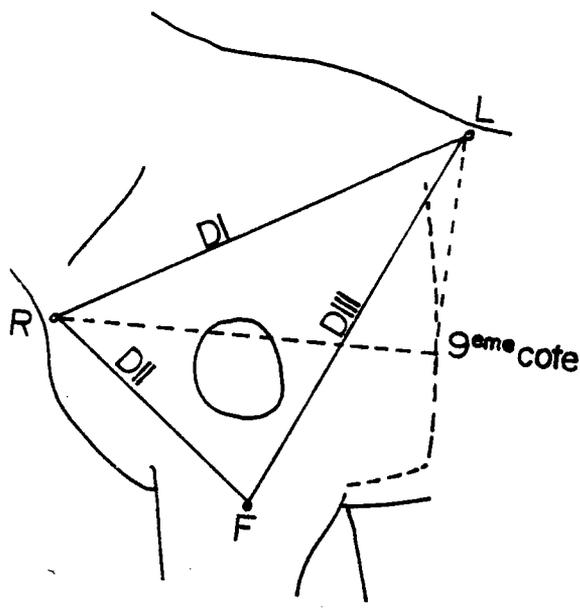


Fig. 25. Dérivations C.E.P.B.

Le triangle ainsi défini est dans le plan sagittal du corps ; il coupe les 2 oreillettes et les 2 ventricules. D II sera en face du ventricule droit et D III en face du ventricule gauche. Bien qu'isocèle, ce triangle permet une décomposition vectorielle vérifiant l'équation d'EINTHOVEN (fig. 25).

Ce système de dérivation offre l'avantage, par rapport aux dérivations de DUBOIS, d'être moins redondant.

### 2.3. Dérivations orthogonales de HAMELIN et SMITH (1961)

Dans le système proposé par EINTHOVEN chez l'homme et par DUBOIS chez les animaux, l'analyse vectorielle ne se faisait que dans un plan : celui du triangle équilatéral. Si chez l'homme l'ensemble des vecteurs représentant l'activation ventriculaire évolue essentiellement dans un même plan, il n'en est pas de même chez les animaux domestiques (ongulés), d'où l'idée d'élargir aux trois dimensions l'analyse vectorielle.

Pour apprécier de façon idéale dans l'espace l'amplitude et la direction des vecteurs cardiaques, 3 dérivations sont nécessaires pour chacun des 3 plans de l'espace, chaque plan étant perpendiculaire aux 2 autres et à la même distance du coeur. On peut alors définir les dérivations orthogonales avec :

- X : direction transverse (droite gauche)
- Y : direction céphalo-caudale (sagittale)
- Z : direction horizontale (haut bas)

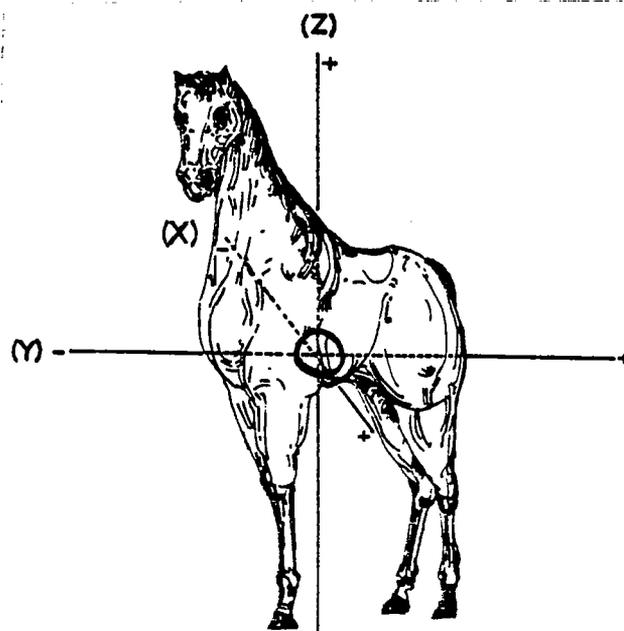


Fig. 26. Définition d'un triaxe anatomique chez le cheval.

On définit ainsi un triaxe ayant son origine dans le coeur, les axes étant ceux du corps et non ceux du coeur (fig. 26).

La fig. 27 donne un exemple de la décomposition dans l'espace d'un vecteur dipôle.

Sur un plan pratique, 3 électrocardiogrammes sont retenus pour obtenir cette décomposition (semi-orthogonale).

- D I (pôle positif : épaule gauche ; pôle négatif : épaule droite) détermine l'axe X ;

- AVF\*, D II et D III peuvent donner l'axe Y ;

- V10 (unipolaire avec le pôle positif au niveau de la 7e vertèbre thoracique et une électrode négative à la borne centrale de WILSON) donne l'axe Z.

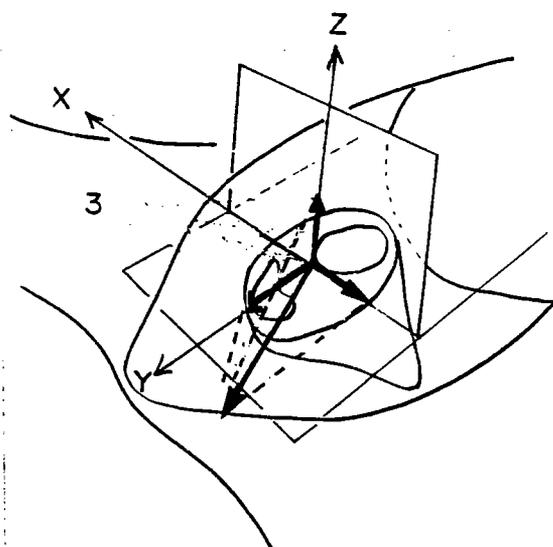


Fig. 27. Décomposition dans l'espace d'un vecteur chez le cheval

Des dérivations réellement orthogonales ont été proposées pour parfaire cette représentation. Pour le chien, McFEE utilise 11 électrodes pour définir les 3 plans de l'espace.

### 3. Les dérivations unipolaires

#### 3.1. Les dérivations unipolaires augmentées

Introduites par WILSON, les dérivations unipolaires permettent l'enregistrement d'ECG qui compléteront l'information apportée par les dérivations bipolaires.

Prendre une dérivation unipolaire consiste à mesurer la différence de potentiel qui existe entre le centre électrique du cœur (potentiel nul) et l'une des électrodes R, L, F. On nomme VR, VL et VP ces

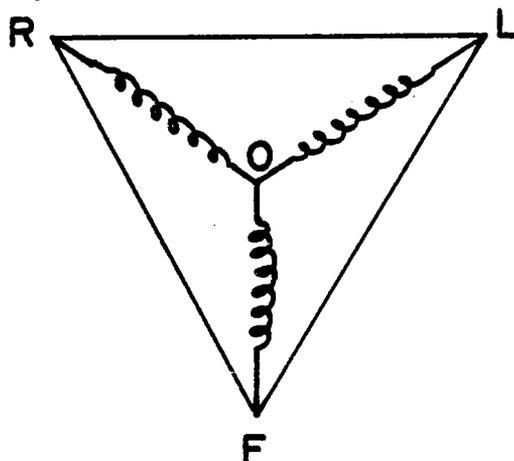


Fig. 28. Borne centrale de Wilson.

ddp. Pour les obtenir, on fabrique une électrode fictive équipotentielle (point O). Elle sera prise comme origine des potentiels. Sur un plan pratique, les électrodes R, L, F sont réunies à une même borne centrale dite de WILSON par 3 résistances d'égales valeurs (5 000 à 10 000 ohms)\*\*. On peut démontrer que le potentiel de ce point est nul.

\* Pour les unipolaires, voir paragraphe suivant

\*\* La valeur de cette résistance a été choisie car elle est très grande vis-à-vis de la résistance tissulaire, mais faible devant la résistance d'entrée des amplificateurs des chaînes de mesure.

D'après la formule du dipôle et les propriétés géométriques du triangle équilatéral, les dérivation unipolaires donneront des déflexions qui seront proportionnelles au cours du temps à la projection du vecteur dipôle sur les axes OR, OL, OV (fig. 29).

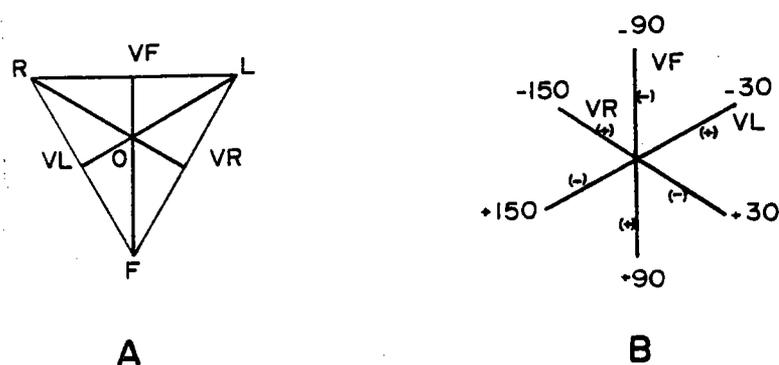


Fig. 29. Définition des dérivation unipolaires simples.

Les dérivation unipolaires utilisées actuellement sont dites augmentées car on compare le potentiel des points R, L et F non pas à zéro, mais à la somme des deux autres potentiels. Le voltage au niveau de R par exemple est comparé à la somme des voltages en L et F. On démontre que la différence de potentiel ainsi obtenue est multipliée par  $\sqrt{3}=1,732$  par rapport aux unipolaires, d'où la terminologie d'"augmentée" (fig. 30).

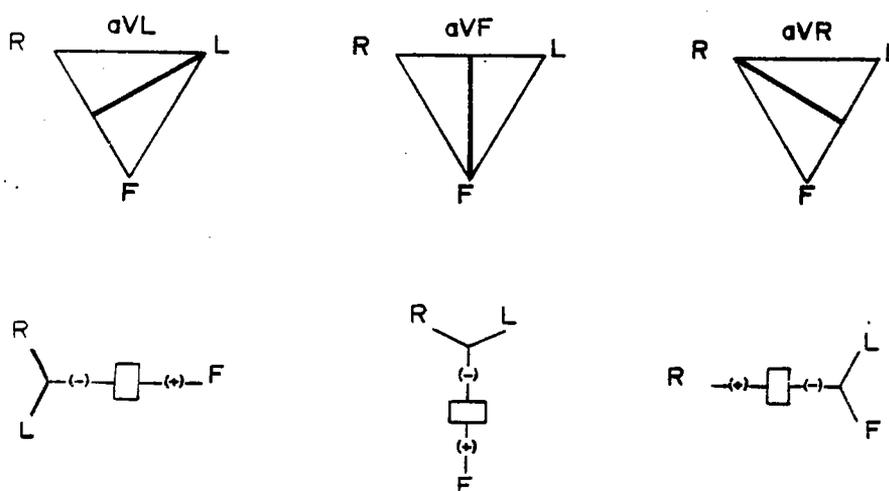


Fig. 30. Définition des dérivation unipolaires augmentées.

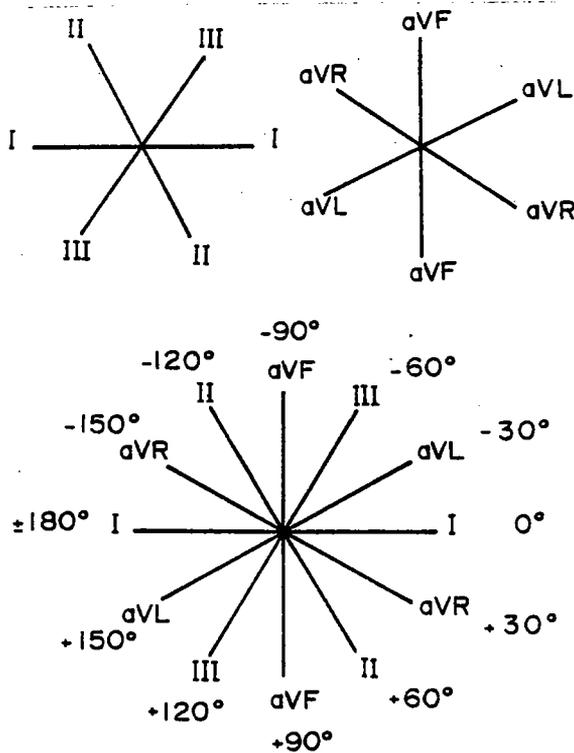


Fig. 31. Repère à 6 axes de Bailey.

L'enregistrement simultané des 3 dérivations standard et des 3 dérivations unipolaires permet de décomposer un vecteur dipôle dans 6 directions du plan frontal.

L'enregistrement simultané des 3 dérivations standard et des 3 unipolaires conduit à décomposer le vecteur dipôle sur 6 axes explorant le plan frontal de 30 en 30 degrés (système de repères à 6 axes de BAILEY) (fig. 31).

### 3.2. Dérivations unipolaires précordiales ou rapprochées

Dans ces dérivations unipolaires, l'électrode exploratrice est placée directement au niveau du thorax et son voltage est comparé à zéro (borne centrale de WILSON). Leur finalité est de déterminer le potentiel en des régions proches du coeur. On suppose qu'elles enregistrent de façon préférentielle l'activité électrique du myocarde auquel elles font face.

Dans ce type de dérivation, les hypothèses d'EINTHOVEN ne sont plus respectées (électrodes rapprochées du coeur) et le support théorique qui a été développé est celui de la théorie de l'angle solide.

En effet, à chaque instant, on peut représenter les effets des régions activées ou encore au repos par un feuillet électrique de puissance constante. Le potentiel en un point du corps sera donc proportionnel à l'angle solide sous lequel le contour du feuillet est vu. Différentes dérivations ont été proposées (DETWEILER et PATTERSON, 1965 ; RIGOLLIER, 1975).

Le principal intérêt des dérivations précordiales réside dans l'étude des dilatations cardiaques et des infarctus du myocarde. On leur reproche d'être d'une interprétation difficile car :

- (a) La position du coeur est variable par rapport aux électrodes.
- (b) Chez les animaux domestiques, le thorax est plus ou moins aplati ; les électrodes étant plus ou moins près du coeur, les déflexions seront d'amplitude variable. Même avec un enregistrement méticuleux, il sera difficile de dire si une grande déflexion dans le 5<sup>e</sup> espace intercostal gauche est due à un thorax plus aplati, à une hypertrophie ventriculaire gauche, ou à une activation ventriculaire aberrante.

## V - L'AXE ELECTRIQUE DU COEUR

### 1. Définition

C'est la valeur moyenne du vecteur au cours de l'activation ventriculaire. Il représente la direction moyenne de l'onde de dépolarisation cardiaque dans les 3 dimensions de l'espace.

### 2. Calculs pour un plan donné

On l'obtient en faisant la somme algébrique des différentes surfaces délimitées par le tracé électrocardiographique de QRS (on compte de façon positive pour les déflexions situées au-dessus de la ligne de base et de façon négative pour les déflexions situées au-dessous de la ligne de base). Sur un plan pratique, on se contente de mesurer la hauteur des déflexions en D II et D III. On les reporte sur un triaxe, ce qui permet de reconstituer le vecteur somme à partir de ses projections en D II et D III. On lit directement sur un cercle gradué la valeur de l'axe électrique moyen (fig. 32).

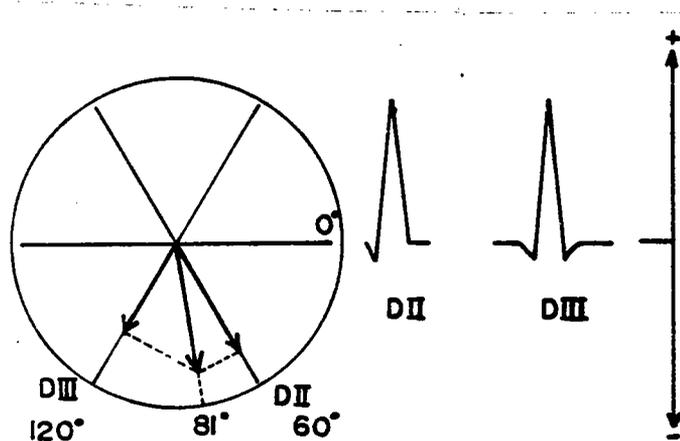


Fig. 32. Calcul de l'axe électrique du coeur.

### 3. Valeurs de référence

Chez l'homme, la valeur oscille entre 20 et 100°. Chez le chien, la valeur moyenne est de  $70 \pm 24^\circ$  ; chez les ongulés, l'axe électrique traduit essentiellement la dépolarisation de la base du coeur, celle-ci se faisant dans un sens apico-basilaire. Cet axe est dirigé céphaliquement : selon la graduation du triaxe, l'axe électrique du coeur est négatif. Chez le cheval, il est compris entre - 2 et - 74° dans le plan frontal ; entre - 81 et - 97° dans le plan transverse et - 80 à 108° dans le plan sagittal.

### 4. Déviations de l'axe électrique du coeur

#### 4.1. Physiologiques

- Race
- Position
- Obésité
- Cycle respiratoire

#### 4.2. Pathologiques

a) Hypertrophie ventriculaire. L'axe se déplace du côté hypertrophié (déviation gauche dans les sténoses aortiques, l'insuffisance aortique, déviation droite dans les sténoses pulmonaires, embolies pulmonaires, maladies congénitales...).

b) Les blocs de branches. Lors d'une lésion du tissu conducteur (faisceau de HIS), les vitesses de dépolarisation sont différentes dans les 2 ventricules chez les animaux du premier groupe (carnivores).

C'est ainsi que dans un bloc de branches gauche, la dépolarisation est 3 fois plus rapide à droite, donc le ventricule gauche reste polarisé alors que le ventricule droit est dépolarisé. De telles lésions chez les ongulés ne semblent pas modifier la dépolarisation ventriculaire.

#### VI - VECTOCARDIOGRAPHIE

Le vectocardiogramme est une boucle fermée représentant le lieu géométrique de l'extrémité libre des vecteurs dipôles successifs. Il existe pour une révolution cardiaque complète 3 boucles successives traduisant la dépolarisation des oreillettes, la dépolarisation ventriculaire et la repolarisation ventriculaire. Ces courbes évoluent dans les 3 dimensions de l'espace. La figure 4 donnait le vectocardiogramme pour le complexe QRS.

Intérêt : Déterminer directement l'axe électrique du coeur. La vectocardiographie spatiale permet de suivre l'évolution des vecteurs dipôles dans l'espace.

#### VII - LES ELECTROCARDIOGRAMMES CHEZ LES ANIMAUX DOMESTIQUES

(durée et amplitude des différentes ondes : tableaux 1 et 2)

##### 1. L'auriculogramme

L'onde P présente une morphologie similaire chez toutes les espèces domestiques. Une certaine variabilité existe chez les chevaux hypervagotoniques (entraîneurs itinérants).

La durée augmente comme la taille des oreillettes (chien : 0,05 s, cheval : 0,15 s). Pour ce dernier, la durée exacte est difficile à apprécier car le retour à la ligne iso-électrique n'est jamais net.

## 2. Le ventriculogramme

La durée du complexe ventriculaire correspond au temps nécessaire pour que la dépolarisation partant de l'extrémité du réseau de PURKINJE atteigne la totalité de la masse ventriculaire. La durée du complexe ventriculaire n'est pas en liaison avec le poids myocardique (chien : 0,06 s, 150 g ; cheval : 0,2 s, 4 kg). Cela tient au fait que le réseau de PURKINJE conduisant vite l'onde de dépolarisation est très développé chez les ongulés. L'absence du vecteur 2 explique la non-modification du ventriculogramme chez les ongulés lors d'hypertrophie ventriculaire. Le fait qu'un coeur hypertrophié par l'exercice musculaire engendre un complexe plus large s'explique mal sur le plan théorique.

## 3. La repolarisation

L'onde T est la plus variable dans sa morphologie, son amplitude et sa durée ; elle est peu exploitée en sémiologie. En revanche, chez le cheval, elle apporte certaines informations sur les aptitudes sportives.

Tableau 1 : Données statistiques chez le cheval

A - Onde P chez le cheval. Voltage et durée des 2 composantes dans chacune des 3 directions de l'espace avec le noeud sinusal pour pace-maker

	X*		Y		Z	
	Amplitude (mV)	Durée (ms)	Amplitude (mV)	Durée (ms)	Amplitude (mV)	Durée (ms)
I	0,07 (± 0,04)	0,59 (± 7,00)	0,14 (± 0,06)	56 (± 11)	- 0,10 (± 0,04)	60 (± 10)
II	0,23 (± 0,06)	69 (± 9)	0,28 (± 0,08)	83 (± 13)	- 0,20 (± 0,06)	82 (± 9)
TOTAL	129 (± 11)		139 (± 13)		143 (± 13)	

\* Dérivation orthogonale

## B - Durée des intervalles ECG en D II (ms)

	P	PR	QRS	QT	FC
Valeurs moyennes	0,117	0,286	0,111	0,475	42,0
Valeurs anormales					
- inférieures à	0,059	0,143	0,068	0,326	19,0
- supérieures à	0,175	0,429	0,155	0,625	79,3

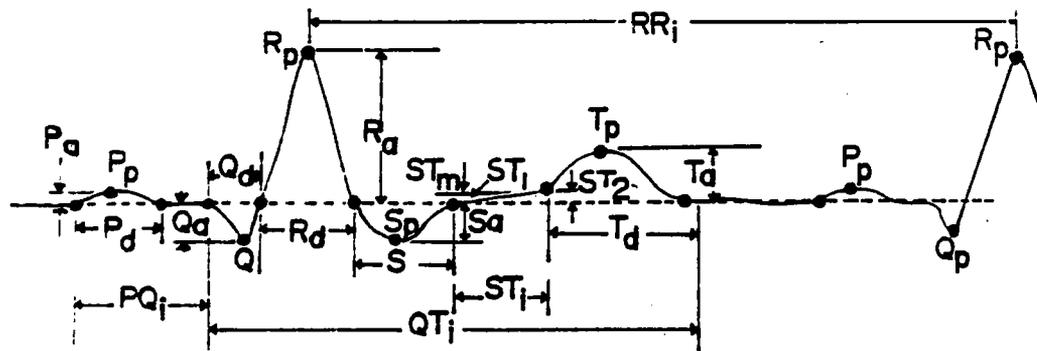
## C - Amplitude des différentes ondes ECG chez le cheval

	P	Q	R	S	ST	T
D I	0,07 (± 0,07)	0,10 (± 0,07)	0,42 (± 0,22)	0,11 (± 0,04)	- 0,01 (± 0,02)	- 0,18 (± 0,22)
D II	0,23 (± 0,18)	0,18 (± 0,12)	0,80 (± 0,47)	0,21 (± 0,17)	- 0,02 (± 0,04)	0,20 (± 0,39)
D III	0,17 (± 0,11)	0,17 (± 0,40)	0,60 (± 0,37)	0,34 (± 0,22)	0,00 (± 0,02)	0,41 (± 0,25)

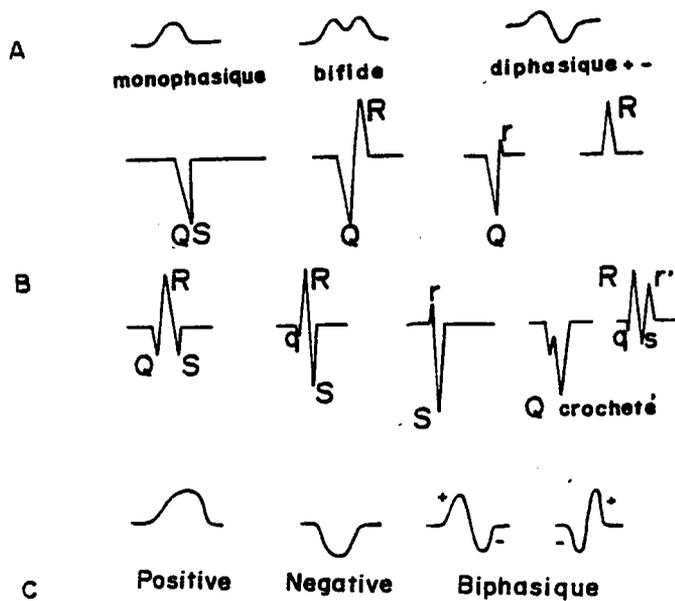
Tableau 2 : Données statistiques chez le chien.

Dérivations	AMPLITUDES (mV)						INTERVALLES (s)		
	P	Q	R	S	ST	T	PR	QRS	QT
I	0,070 ±0,064	0,522 ±0,388	0,778 ±0,480	0,184 ±0,180	0,016 ±0,360	-0,072 ±0,140	0,096 ±0,019	0,035 ±0,007	0,167 ±0,018
II	0,242 ±0,116	0,682 ±0,454	2,406 ±0,876	0,318 ±0,258	-0,036 ±0,052	-0,146 ±0,336	0,098 ±0,016	0,041 ±0,008	0,176 ±0,018
III	0,180 ±0,112	0,428 ±0,268	1,890 ±0,760	0,432 ±0,330	-0,036 ±0,048	-0,030 ±0,310	0,099 ±0,017	0,041 ±0,008	0,177 ±0,018

## VIII - TECHNIQUE D'ENREGISTREMENT ET DE LECTURE D'UN TRACE ELECTRO-CARDIOGRAPHIQUE



*Fig. 33. Principaux paramètres étudiés sur un électrocardiogramme.*



*Fig. 34. Terminologie.*

- A. Onde P
- B. Complexe ventriculaire
- C. Onde T

Consulter le polycopié de travaux pratiques. Les fig. 33 et 34 rappellent la terminologie employée pour décrire un ECG.

## IX - UTILISATION DE L'ELECTROCARDIOGRAPHIE

### 1. Physiologie du sport

Elle sera traitée dans un travail dirigé à la fin du cours.

### 2. Sémiologie

Les applications sémiologiques de l'ECG seront développées dans les cours spécialisés.