

UNIVERSITE DE LILLE
FACULTE DE MEDECINE HENRI WAREMBOURG
Année 2022

THESE POUR LE DIPLOME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MEDECINE

**Les médecins généralistes peuvent-ils se fier aux interpréteurs
automatisés d'ECG ? Revue critique de la littérature.**

Présentée et soutenue publiquement le 01 12 2022
à 16 :00 au pôle recherche

Par Mona DJEBARA

JURY

Président :

Monsieur le Professeur Emmanuel CHAZARD

Assesseurs :

Monsieur le Docteur Matthieu CALAFIORE

Monsieur le Docteur Youssef LAKHAL

Directeur de thèse :

Monsieur le Professeur Emmanuel CHAZARD

Avertissement

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.

Sigles

AAFP	<i>American Academy of Family Physicians</i>
ACCAHA	<i>American College of Cardiology et de American Heart Association</i>
ACFA	Arythmie Cardiaque par Fibrillation Auriculaire
ANN	<i>Artificial Neural Networks</i>
AVC	Accidents Vasculaires Cérébraux
BAV	Bloc Atrio-Ventriculaire
BB	Bloc de Branche
BBD	Bloc de Branche Droit
BBG	Bloc de Branche Gauche
Bpm	Battement par minute
BSA	Bloc Sinu-Atrial
CIE	<i>Computer-Interpreted Elctrocardiograms</i>
CV	Cardio-vasculaires
ECG	Électrocardiogramme
ECG-CI	<i>Electrocardiogram-Computer Interpreted</i>
ESC	<i>European Society of Cardiology</i>
FA	Fibrillation Atriale
FC	Fréquence Cardiaque
FFC	Fédération Française de Cardiologie
HAD	Hypertrophie Auriculaire Droite
HAG	Hypertrophie Auriculaire Gauche
HAS	Haute Autorité de Santé
HBD	Hémi-Bloc Droit
HBG	Hémi-Bloc Gauche

HMM	<i>Hidden Markov Models</i>
HTA	HyperTension Artérielle
HVD	Hypertrophie Ventriculaire Droite
HVG	Hypertrophie Ventriculaire Gauche
IA	Intelligence Artificielle
IDM	Infarctus Du Myocarde
IMC	Indice de Masse Corporelle
MAPA	Mesure de la Pression Artérielle en Ambulatoire
MG	Médecin Généraliste
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
SCA	Syndrome Coronarien Aiguë
SCA ST-	Syndrome Coronarien Aiguë sans sus-décalage ST
SCA ST+	Syndrome Coronarien Aiguë avec sus-décalage ST
SVM	<i>Support Vector Machines</i>
TV	Tachycardie Ventriculaire
WHO	<i>World Health Organization (OMS)</i>

Sommaire

Avertissement.....	2
Remerciements	Erreur ! Signet non défini.
Sigles.....	3
SommaireIntroduction	5
Introduction.....	9
1 Rappel anatomique, physiologique et épidémiologique sur le cœur.....	9
1.1 Anatomie et physiologie cardiaque	9
1.2 Anatomie du cœur.....	9
1.2.1 Position	9
1.2.2 Configuration extérieure	10
1.2.3 Configuration intérieure	11
1.2.4 Vaisseaux du cœur.....	12
1.3 Physiologie.....	13
1.3.1 Tissu nodal	13
1.3.2 De l'influx nerveux à la contraction.....	14
1.3.3 De la contraction au flux sanguin : la circulation sanguine.....	15
1.3.4 Du flux sanguin à l'oxygénation des organes : la vascularisation fonctionnelle	15
2 Électrocardiographie	15
2.1 Définitions.....	15
2.2 Historique	16
2.3 La réalisation de l'ECG conventionnel	19
2.4 Principes.....	21
2.4.1 Cycle électrique cardiaque	21
2.4.2 Détection.....	22
2.4.3 Retranscription.....	22
2.4.4 Correspondance anatomique des dérivations de l'ECG.....	23
2.4.5 Interprétation de l'ECG	24
2.5 Intérêt diagnostique.....	26
2.6 Place de l'ECG en soins primaires.....	27
2.6.1 Prévention primaire.....	27
2.6.2 Prévention secondaire	28
2.7 Électrocardiographie dans la pratique médicale	28

2.7.1	Modalités et indications	28
2.7.2	Épidémiologie	30
2.8	Interprétation visuelle de l'ECG	30
2.8.1	Profil des médecins généralistes	30
2.8.2	Interprétation visuelle.....	31
2.8.3	Courbe d'apprentissage.....	31
2.8.4	Nouvelles approches de formation	32
3	Interprétation automatisée de l'ECG	32
3.1	Définition	32
3.2	L'intelligence artificielle.....	33
3.2.1	1 ^{er} niveau	33
3.2.2	2 ^e niveau	33
3.2.3	3 ^e niveau	33
3.3	Les fondamentaux de l'interprétation automatisée de l'ECG	33
3.3.1	Historique.....	33
3.3.2	Principes	33
3.3.3	Complexité des programmes d'interprétation de l'ECG.....	34
3.4	Soins primaires.....	35
3.4.1	Épidémiologie	35
3.4.2	Finalités	35
3.5	Performances très différentes entre études	35
3.5.1	Généralités	35
3.5.2	Performance d'analyse mitigée	36
3.6	Analyse des études	36
3.6.1	Précision diagnostique variable	36
3.6.2	Variabilité majorée selon les pathologies étudiées.....	37
3.6.3	Perspectives d'amélioration	38
4	Objectif	38
Article en Anglais		39
1	Introduction.....	39
2	Material and methods.....	40
2.1	Study design.....	40
2.2	Paper inclusion	40
2.3	Paper annotation	41
2.3.1	Procedure	41

2.3.2	Criteria	41
2.4	Statistical analysis	43
2.5	Regulatory framework	43
3	Results	44
3.1	Flowchart.....	44
3.2	Description of the studies	44
3.3	Evaluation of quality defects (potential biases)	44
3.4	Interest links score	46
3.5	Satisfaction score	47
3.6	Bivariate analyses	48
4	Discussion	48
4.1	Key results.....	48
4.2	Discussion of the results	49
4.3	Discussion of the method	49
4.4	Clinical significance and perspectives.....	50
4.4.1	Clinical significance	50
4.4.2	Several perspectives	50
5	Conclusion.....	51
	Liste des tables.....	52
	Liste des figures	53
	Annexe 1 – Vascularisation cardiaque	55
1	Le réseau artériel	55
1.1	Artère coronaire gauche.....	55
1.2	Artère coronaire droite.....	55
2	Veines coronaires.....	56
3	Innervation cardiaque.....	56
3.1	Le système parasymphatique cardiaque.....	57
3.2	Le système sympathique cardiaque.....	57
3.3	Plexus.....	57
	Annexe 2 – Physiologie cardiaque	58
1	La systole ventriculaire.....	58
2	La diastole ventriculaire.....	58
	Annexe 3 – Pathologies cardiaque détectées par l’ECG.....	60
1	Troubles de conduction	60
1.1	Blocs de branche.....	60

1.2	Hémi-blocs gauches	61
1.3	Blocs atrio-ventriculaires	61
1.4	Dysfonction sinusale	62
1.5	Syndrome Wolf Parkinson White.....	62
2	Troubles du rythme supraventriculaires	62
2.1	Fibrillation atriale	63
2.2	Flutter atrial	63
2.3	Tachycardie atriale	63
2.4	Tachycardie jonctionnelle	64
2.5	Extrasystole atriale	64
3	Troubles du rythme ventriculaire	64
3.1	Tachycardie ventriculaire	64
3.2	Fibrillation ventriculaire.....	64
3.3	Torsade de pointe	65
3.4	Extrasystole ventriculaire	65
4	Maladie coronaire.....	65
4.1	Syndromes coronariens avec sus-décalage ST	66
4.1.1	Sus-décalage ST	66
4.1.2	Onde T négative	67
4.1.3	Onde Q de nécrose	67
4.1.4	Cas particuliers : BBG et piles cardiaques	67
4.2	Syndromes coronaires sans sus-ST	68
5	Hypertrophie	68
6	Péricardite	68
7	Myocardite.....	68
8	Pathologies extracardiaques	69
	Annexe 4 – Formulaire d’annotation.....	70
	Annexe 5 – bulletin du CDOM 59	71
	Références	72

Introduction

Ce travail s'intéresse aux articles évaluant l'interprétation automatisée de l'électrocardiogramme (ECG). Nous commencerons par un rappel exhaustif des bases anatomiques et physiologiques du fonctionnement cardiaque ainsi que des principales pathologies investiguées par l'ECG. Nous aborderons ensuite le principe de l'ECG et son interprétation automatisée.

1 Rappel anatomique, physiologique et épidémiologique sur le cœur

1.1 Anatomie et physiologie cardiaque

1.2 Anatomie du cœur

Le cœur est un organe impair, essentiellement musculaire qui pèse environ 300 grammes [1].

Il s'agit d'une pompe constituée de cavités, de vaisseaux et de valves permettant la circulation du sang dans un seul sens et dont les parois sont essentiellement musculaires.

1.2.1 Position

Le cœur est situé dans la cage thoracique en position médiane gauche (Figure 1) entre les 2 lobes pulmonaires. Il se trouve dans le médiastin antérieur, au-dessus de la coupole diaphragmatique, en avant de l'œsophage et derrière le sternum.

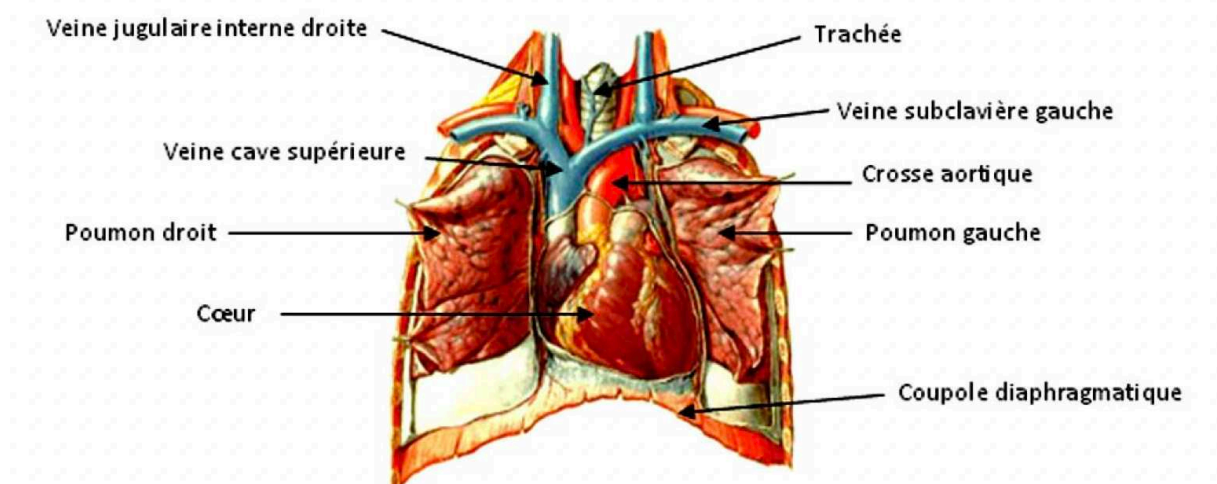


Figure 1 : Médiastin antérieur (d'après F. Netter, Atlas d'anatomie humaine [2])

1.2.2 Configuration extérieure

1.2.2.1 *Forme générale*

Le cœur a la forme d'une pyramide composée de 3 faces, 1 sommet (ou apex) et 1 base [3] :

- La face antérieure ou sterno-chondro-costale,
- La face inférieure ou diaphragmatique,
- La face latérale ou pulmonaire,
- Le sommet orienté vers le bas, à gauche et en avant. Il représente la direction du grand axe,
- Et la base qui regarde en arrière et à droite. Il correspond aux deux atriums.

1.2.2.2 *Cavités*

Le cœur est composé de quatre cavités principales, couplées deux par deux, qui forment le cœur droit et gauche.

Chacune de ces deux parties comprend une oreillette et un ventricule. L'oreillette se décompose en deux parties : une cavité principale sphérique appelée atrium et un auricule, qui correspond à un reliquat embryonnaire.

1.2.2.3 *Sillons*

La surface externe du cœur est parcourue par deux sillons profonds qui contiennent les branches principales des vaisseaux coronaires (Figure 2) :

- Le sillon atrio-ventriculaire situé entre les atriums en arrière, et les ventricules plus antéroinférieurs,
- Et le sillon inter-ventriculaire, puis inter-atrial situé entre le cœur droit et le cœur gauche.

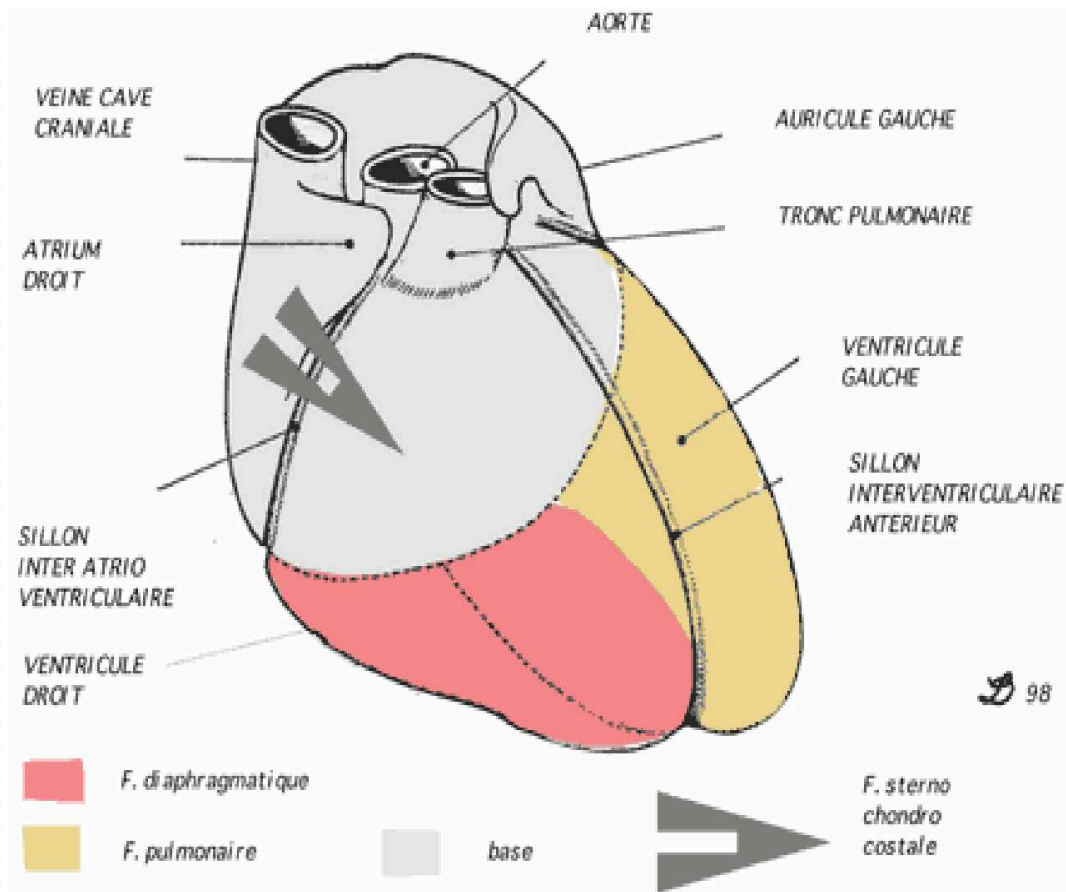


Figure 2 : Configuration extérieure du cœur (par le Dr SELIT [4])

1.2.3 Configuration intérieure

1.2.3.1 Septums

Plus en profondeur, les atriums sont séparés par une cloison appelée septum inter-atrial, les ventricules par le septum inter-ventriculaire (Figure 3) et l'atrium droit du ventricule gauche par le septum atrio-ventriculaire.

1.2.3.2 Valves

Il existe deux appareils valvulaires atrio-ventriculaires formés d'un anneau fibreux et d'un système valvulaire constitué de valvules, de cordages et de piliers :

- La valve tricuspide (Figure 3), située entre l'atrium et le ventricule droits, composée de trois valvules.
- Et la valve mitrale, située entre l'atrium et le ventricule gauches, composée de deux valvules.

Les orifices artériels, pulmonaire et aortique, sont formés chacun d'un anneau fibreux et de trois valvules dites sigmoïdes.

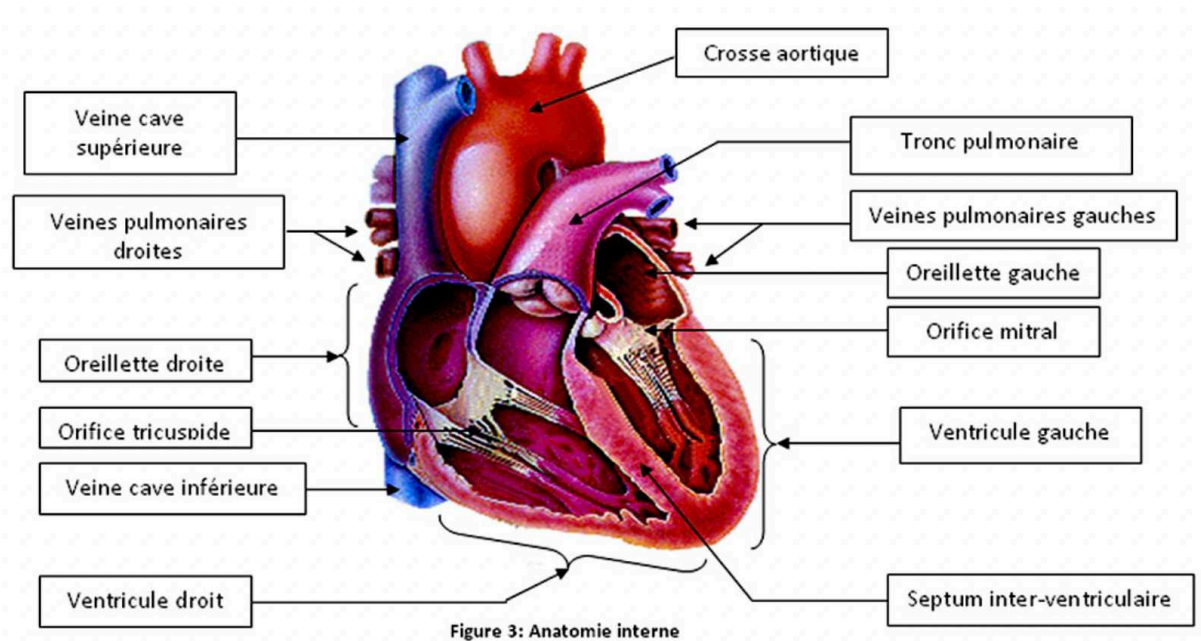


Figure 3 : Anatomie interne (d'après F. Netter, Atlas d'anatomie humaine [2])

1.2.3.3 Structure des parois

La paroi du cœur est constituée de trois couches qui sont de l'intérieur vers l'extérieur [5] :

- L'endocarde, structure fine qui tapisse les cavités et recouvre en outre les valvules cardiaques,
- Le myocarde, partie principale du cœur, constitué d'un muscle strié, capable de se contracter de manière régulière et autonome, sensible à des stimulations hormonales et neuronales,
- Et le péricarde, enveloppe externe du cœur, composé de deux feuillets principaux : séreux et fibreux.

La paroi des ventricules est plus épaisse que celle des atriums car le myocarde y est plus important notamment au niveau du ventricule gauche.

A la jonction atrio-ventriculaire, les fibres myocardiques atriales et ventriculaires se fixent sans se toucher au niveau d'une structure fibreuse qui réunit les orifices valvulaires. De ce fait, il n'y a pas de connexion myocardique entre atriums et ventricules, à l'origine de l'isolation électrique.

1.2.4 Vaisseaux du cœur

La circulation coronaire est la circulation artérielle et veineuse systémique propre au cœur.

La distribution du sang au myocarde, par les branches de ramification des artères coronaires est de type terminal [6]. L'absence d'anastomoses ne permet pas une éventuelle circulation de suppléance.

La dominance coronaire correspond au territoire vasculaire myocardique le plus développé. Elle peut être gauche ou droite et varier d'un sujet à l'autre.

Annexe 1 – Vascularisation cardiaque.

1.3 Physiologie

Le cœur peut être considéré comme une pompe musculaire qui fonctionne grâce au tissu nodal et à la circulation sanguine coronaire.

Le cœur propulse le sang de manière synchrone dans les circulations pulmonaire et systémique qui rétroagissent sur son fonctionnement. En effet, le cœur adapte le débit sanguin aux besoins de l'organisme grâce à un système de régulation nerveux et hormonal [7].

1.3.1 Tissu nodal

Le tissu nodal correspond au système intrinsèque de l'innervation cardiaque. Il est à l'origine des impulsions électriques responsables des contractions cardiaques.

Il est constitué (Figure 4) du nœud sinusal (1) siégeant dans la paroi de l'atrium droit près de l'abouchement de la veine cave supérieure. Ce nœud est ensuite relié à des faisceaux de fibres présents à l'intérieur des atriums et cheminant vers le nœud atrio-ventriculaire (2). Ce dernier siège au niveau de la jonction de l'atrium et du ventricule droits. Il donne naissance au tronc du faisceau de His (3) qui se divise en deux branches droite et gauche (4), destinées respectivement par l'intermédiaire du réseau de Purkinje, à la contraction myocardique des ventricules droit et gauche [7].

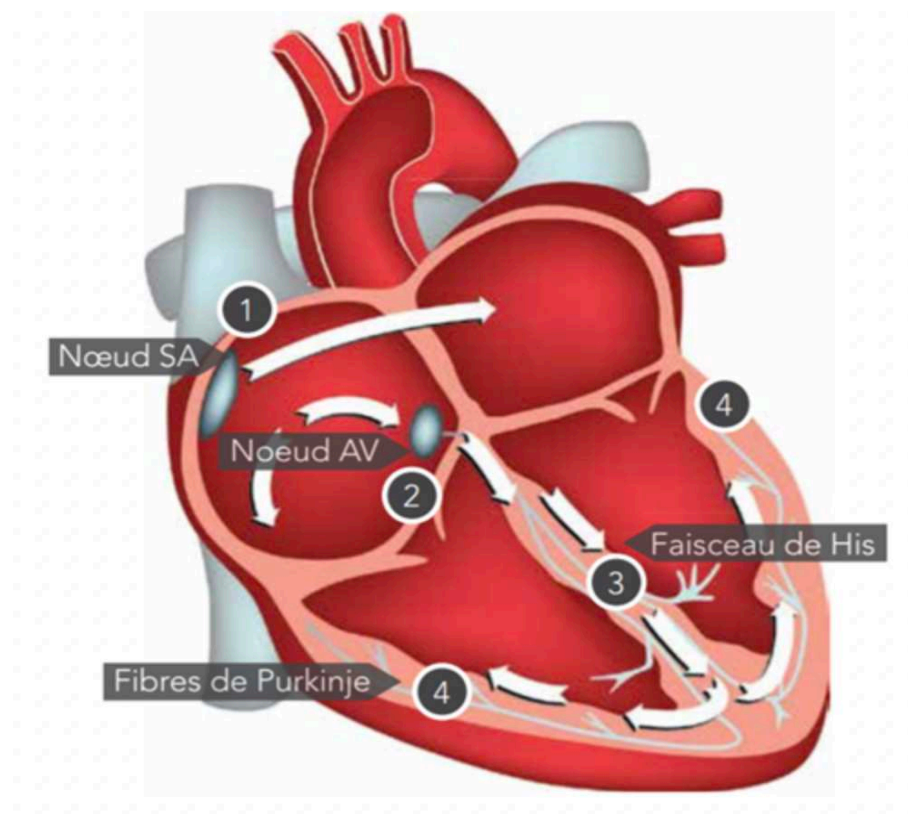


Figure 4 : Activité électrique du cœur (Fondation des maladies du cœur et de l'accident vasculaire cérébral du Canada [8])

1.3.2 De l'influx nerveux à la contraction

1.3.2.1 Le potentiel d'action

Une fibre myocardique au repos est polarisée avec une prédominance de charges positives à l'extérieur et négatives à l'intérieur. La différence de potentiel de part et d'autre de la membrane est de l'ordre de -90 mV : c'est le potentiel de repos transmembranaire [9].

Le tissu nodal entraîne la dépolarisation de la cellule myocardique responsable du potentiel d'action.

Le potentiel d'action est composé de cinq étapes [10] (Figure 5) :

- La phase 0 correspond à la dépolarisation ventriculaire liée à l'entrée de sodium. En quelques millisecondes, la modification du potentiel transmembranaire passe de -90 mV à $+20$ mV.
- La phase 1 de repolarisation initiale.
- La phase 2 de dépolarisation maintenue est liée à des mouvements de calcium permettant la contraction cellulaire.
- La phase 3 de repolarisation où la cellule redevient positive à sa surface.
- La phase 4 de polarisation stable.

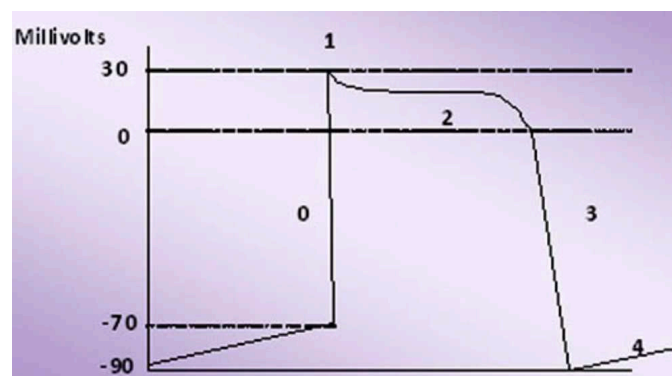


Figure 5 : Les phases du potentiel d'action cardiaque (Dr Mervoyer [11])

1.3.2.2 Le couplage excitation-contraction

Le potentiel d'action entraîne le raccourcissement des protéines contractiles de la cellule. C'est la dépolarisation simultanée de plusieurs cellules qui permettra la contraction des cellules myocardiques. En effet, toutes les cellules myocardiques reçoivent l'impulsion électrique du tissu nodal, au cours d'un instant bref (6 à 8 / 100 secondes) pour se contracter de manière coordonnée [12].

1.3.2.3 La conduction

La naissance de l'activité électrique se fait au niveau du nœud sinusal [7]. Elle est ensuite propagée dans les atriums de droite à gauche entraînant leur contraction. Le courant électrique se propage ensuite vers le nœud atrio-ventriculaire, le faisceau de His, puis les cellules de Purkinje et enfin les cellules du myocarde ventriculaire. La régulation électrique se fait au niveau du nœud atrio-ventriculaire.

Cette voie « nodo-hissienne » est la seule voie de passage électrique possible des atriums vers les ventricules au travers du squelette fibreux du cœur.

Pendant que les ventricules se dépolarisent, les atriums retrouvent leur négativité électrique interne. Ce processus est appelé « repolarisation » conduisant au potentiel de repos, qui permet à la cellule de se décontracter. Une fois que les ventricules se sont complètement dépolarisés, ils se repolarisent eux aussi et ainsi de suite [9].

1.3.3 De la contraction au flux sanguin : la circulation sanguine

La circulation sanguine est assurée par la systole qui correspond à la contraction cardiaque et la diastole qui est la phase de relaxation. En pratique courante, on parle de « systole » ou de « diastole » pour désigner la systole ou la diastole ventriculaire [13,14].

Les valvules cardiaques interviennent dans le sens de la circulation sanguine.

Annexe 2 – Physiologie cardiaque.

1.3.4 Du flux sanguin à l'oxygénation des organes : la vascularisation fonctionnelle

Le cœur droit envoie le sang dans la circulation pulmonaire pour se réoxygéner (Figure 6) et le cœur gauche permet de le redistribuer dans la circulation systémique [7].

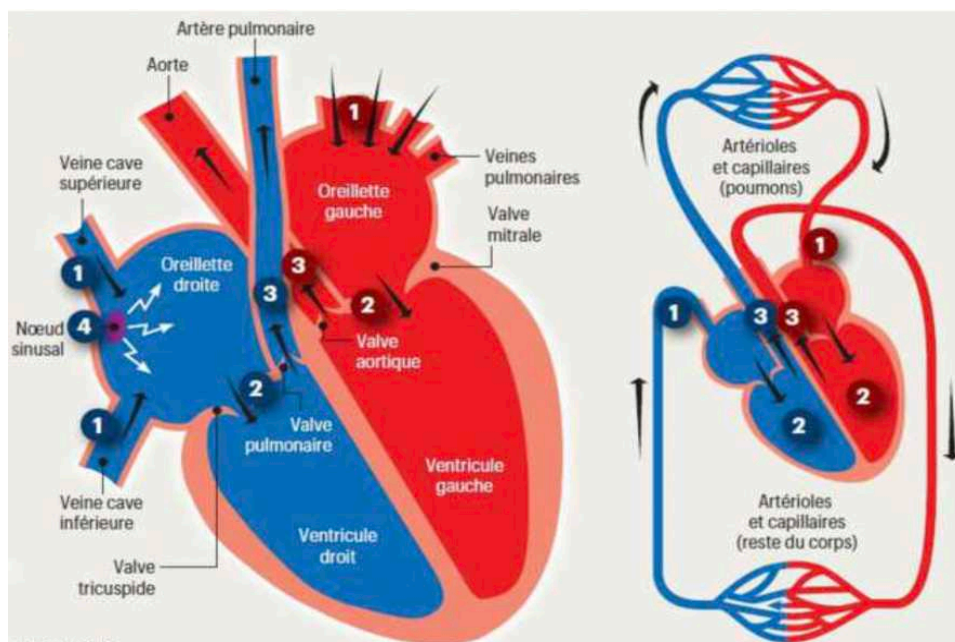


Figure 6 : Le cœur et la circulation sanguine (de la Fondation des maladies du cœur et de l'AVC du Canada [8])

2 Électrocardiographie

2.1 Définitions

L'électrocardiographie est l'examen qui vise à mesurer et à enregistrer l'activité électrique du cœur d'un patient.

L'électrocardiographe est l'appareil permettant de tracer un électrocardiogramme (ECG).

L'électrocardiogramme est un enregistrement graphique des potentiels électriques générés par les fibres musculaires cardiaques actives au cours de chaque cycle cardiaque. Ces potentiels de faible amplitude peuvent être détectés à la surface du corps à l'aide d'électrodes fixées aux extrémités et à la paroi thoracique, puis sont amplifiés par l'électrocardiographe et affichés sur un écran ou imprimés sur du papier millimétré.

2.2 Historique

Les potentiels électriques, détectés par l'électrocardiographe, sont connus depuis les travaux de Carlo Matteucci en 1842.

Les premières expérimentations sont réalisées en 1878 par John Burden Sanderson et Frederick Page qui détectent à l'aide d'un électromètre capillaire (Figure 7) les phases QRS et T.

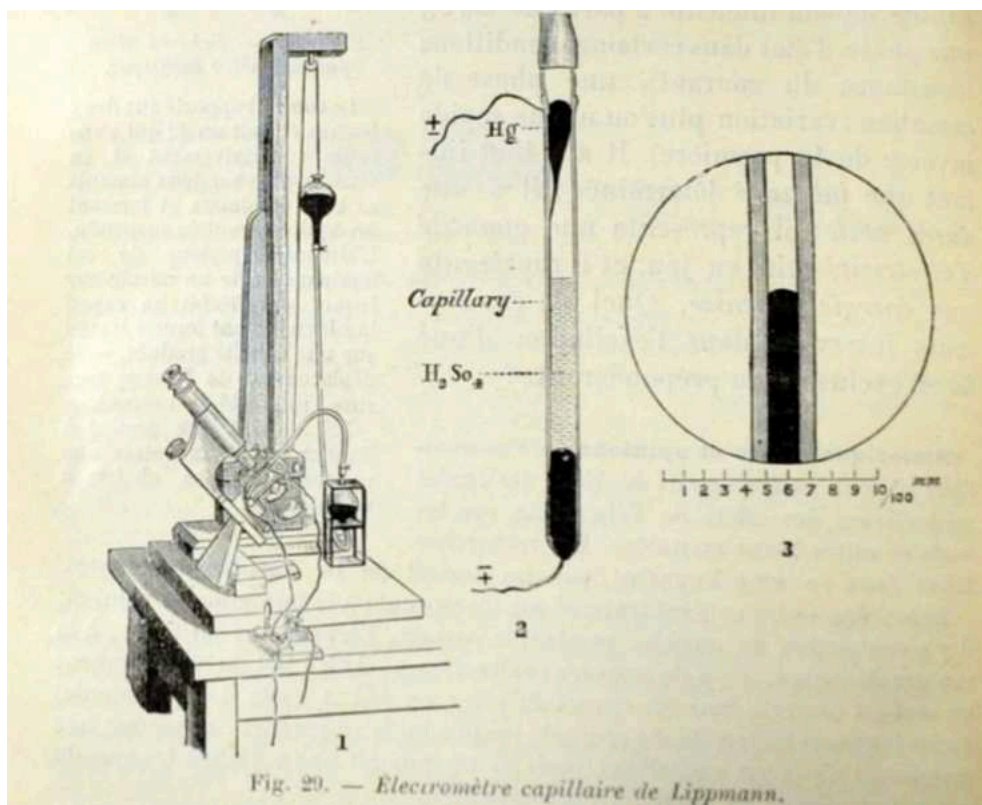
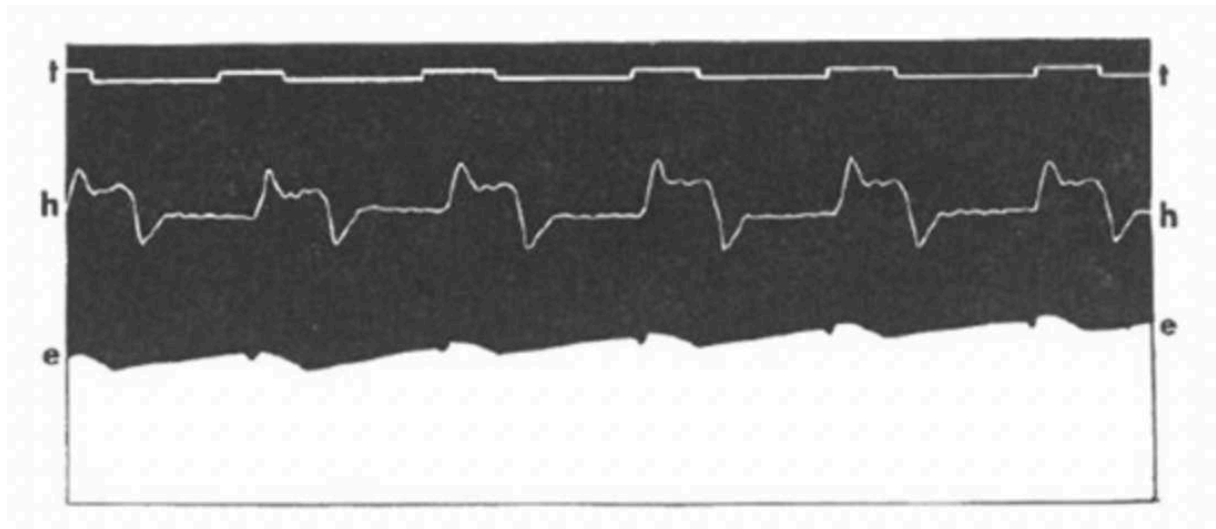


Figure 7 : Électromètre capillaire de Lippmann (de Morat [15])

En 1887, le premier ECG humain est publié par Augustus D. Waller [16]. Il a enregistré les courbes de l'activité électrique du cœur humain à l'aide d'électrodes tubulaires remplies de sérum physiologique et de l'électromètre capillaire mis au point par Gabriel Lippmann (Figure 8).



*Figure 8 : Cardiogramme de Waller enregistré à l'aide d'un électromètre capillaire.
e : activité électrique du cœur; h : apex cardiogramme; t: temps
(d'après Antoni Bayes de Luna [16])*

Willem Einthoven mettra en place l'électrocardiographe à partir des travaux cités ci-dessus, en améliorant la version de Waller à l'aide d'un mince filament de quartz recouvert d'argent.

En 1901, il expérimente dans un premier temps le galvanomètre à cordes (Figure 9). Il permet d'échapper aux calculs fastidieux de l'électromètre capillaire et d'enregistrer avec précision les potentiels électriques générés par le cœur humain. Cependant, c'est une énorme machine qui pèse 270 kg, et qui nécessite un système de refroidissement ainsi que 5 personnes pour la faire fonctionner. Pour qu'elle fonctionne, il fallait que le patient puisse tremper 3 membres dans une bassine d'eau comme illustré sur l'image ci-dessous [17].

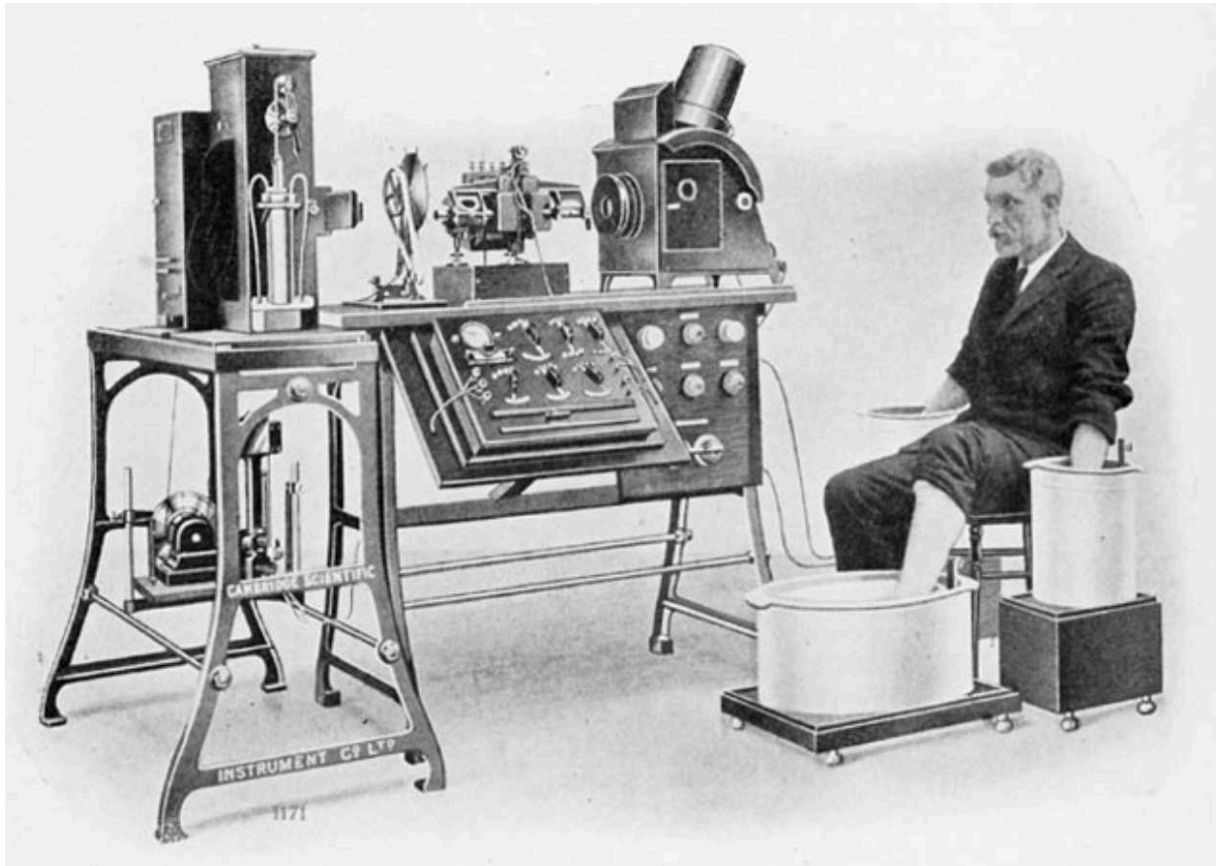
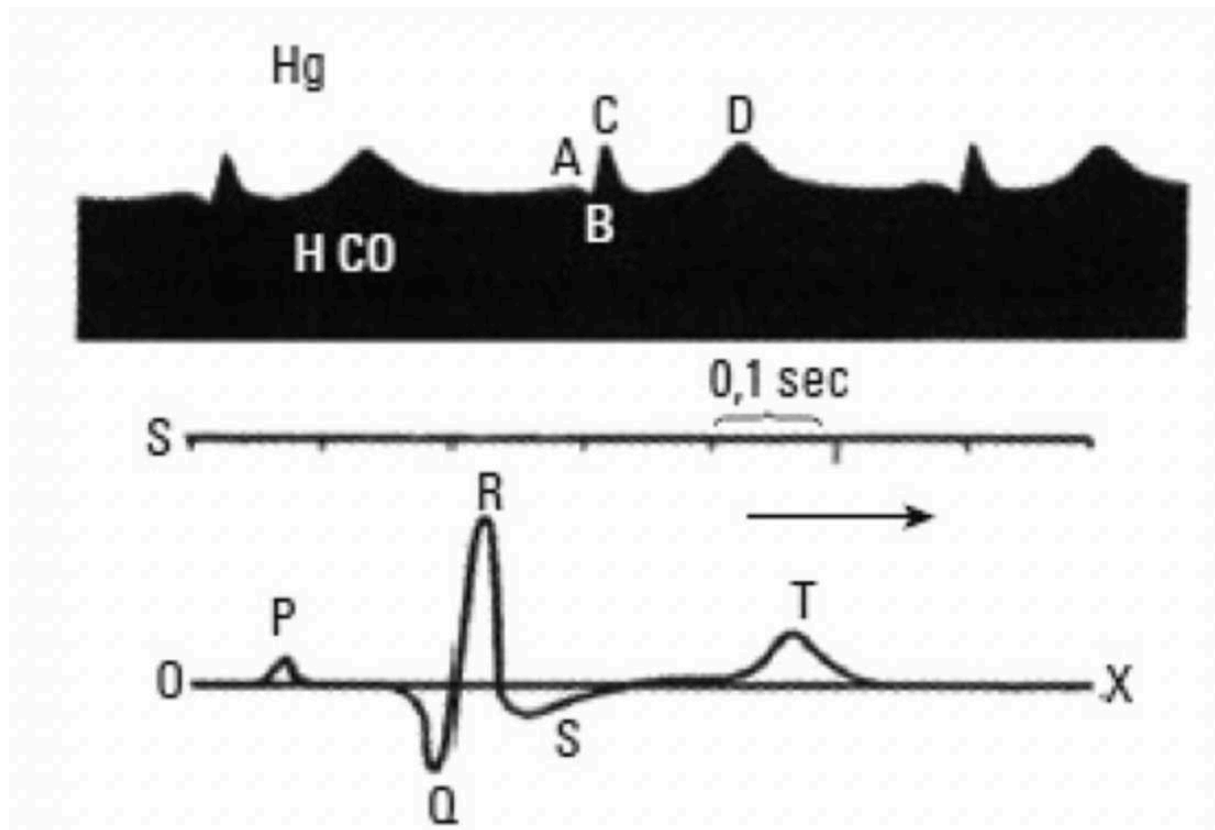


Figure 9 : Le galvanomètre d'Einthoven (d'après George E. Burch [16])

Il met en évidence une forme d'onde avec 3 pics et 2 dépressions à l'origine des lettres utilisées actuellement : P, Q, R, S et T (Figure 10).

En 1906, il identifie les premières classifications d'ECG pathologiques, ainsi que les dérivations frontales bipolaires (DI, DII, DIII). Il met également en place la télémétrie permettant de transmettre via une connexion par câble, les ECG dans les différents services [18].



*Figure 10 : Enregistrement d'Einthoven à l'aide d'un électromètre capillaire.
En haut : ondes A, B, C et D; en bas: ondes corrigées mathématiquement, désormais désignées par P
QRS T (d'après Antoni Bayes de Luna [16])*

En 1913, il décrit le célèbre “triangle d'Einthoven” permettant d'interpréter les courbes de potentiel du myocarde.

En 1924, il obtient le prix Nobel pour ses travaux sur l'ECG.

D'un point de vue historique, les deux plus importants pionniers de l'électrocardiographie clinique du vivant d'Einthoven sont Sir Thomas Lewis et Frank N. Wilson [16], qui est le père des dérivations unipolaires et précordiales.

Les dérivations précordiales sont utilisées pour le diagnostic médical à partir de 1932, et les dérivations frontales unipolaires à partir de 1942, ce qui permettra à Emmanuel Godberger de réaliser le premier tracé sur 12 voies [17].

En 1938, la conférence internationale transatlantique fixe la position des dérivations précordiales V1 à V6 [17].

2.3 La réalisation de l'ECG conventionnel

Un ECG standard ou conventionnel est un enregistrement classique de 30 secondes et 12 dérivations le plus souvent. Il peut s'effectuer en consultation, en ambulance ou au lit du malade. Le patient doit être allongé confortablement, dans une pièce de température agréable pour éviter les tremblements musculaires et les artéfacts (Figure 11).

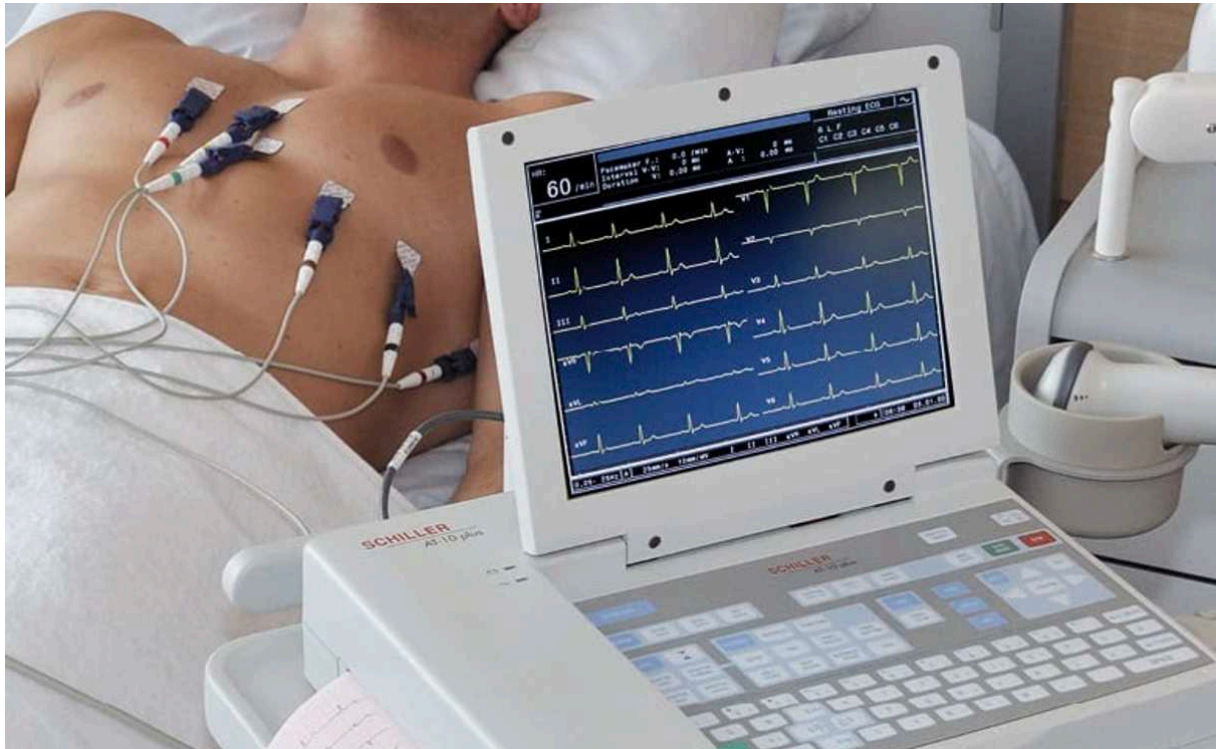


Figure 11 : Électrocardiographe autonome actuel (De Médisprostore de Schiller [19])

Les 10 électrodes sont fixées avec des ventouses ou des pastilles adhésives.

4 électrodes permettent l'enregistrement sur le plan frontal. Une électrode est posée sur le bras droit, une sur le bras gauche et une sur la jambe gauche. L'électrode sur la jambe droite est indifférente.

Les 6 électrodes sur le plan précordial sont fixées sur le thorax de la façon suivante (Figure 12) :

- V1 : au 4^{ème} espace intercostal, côté droit du sternum ; V2 : côté gauche du sternum (V2),
- V3 : à équidistance de V2 et V4,
- V4 : au 5^{ème} espace intercostal et sur la ligne médio-claviculaire,
- V5 : au 5^{ème} espace intercostal et sur la ligne axillaire antérieure,
- V6 : au 5^{ème} espace intercostal et sur la ligne axillaire moyenne.

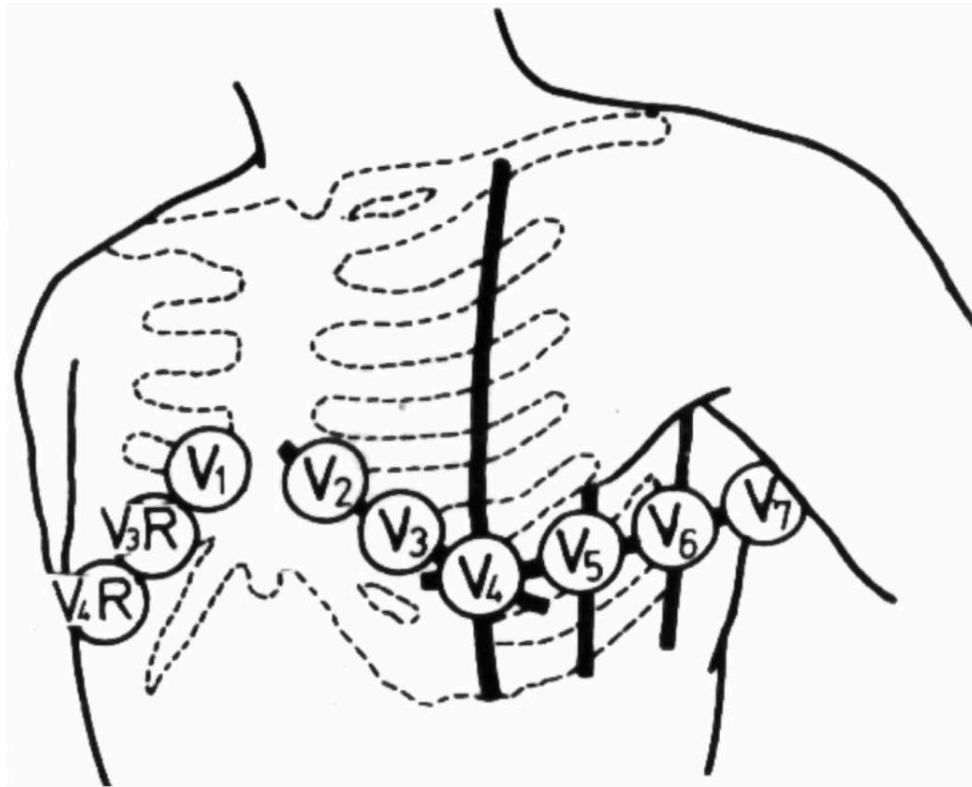


Figure 12 : Localisation des précordiales (d'après le CNEC [11])

Des électrodes supplémentaires peuvent être utilisées dans des circonstances particulières, telle que l'infarctus du myocarde (IDM) :

- V7 : placée au 5^e espace intercostal, sur la ligne axillaire postérieure
- V8 : placée au 5^e espace intercostal, sur la ligne médio-scapulaire, à hauteur de l'angle inférieur de la scapula
- V9 : au 5^e espace intercostal, sur la ligne paravertébrale gauche
- V3R et V4R symétriques respectivement à V3 et V4.

Un mauvais placement des sondes thoraciques peut être responsable d'une erreur diagnostique.

2.4 Principes

2.4.1 Cycle électrique cardiaque

L'événement déclencheur de la contraction cardiaque est la propagation de courant électrique dépolarisant à travers le cœur. Ce courant est produit par trois types de cellules : celles du stimulateur cardiaque, des tissus de conduction spécialisés (tissu nodal) et du muscle cardiaque lui-même.

L'ECG de surface n'enregistre que les potentiels de dépolarisation et de repolarisation des fibres myocardiques auriculaires et ventriculaires.

Quand une onde s'éloigne de l'électrode de recueil, elle est négative. Lorsqu'elle se dirige vers l'électrode, elle est positive.

2.4.2 Détection

Les données détectées par les électrodes sont retranscrites sur du papier graphique pour produire un ECG, sous forme de dérivation [20].

Chaque dérivation correspond à un axe de vue du cœur. Elle indique la mesure par un galvanomètre d'une différence de potentiel entre deux électrodes placées au niveau de deux points différents du corps.

L'ECG standard comporte au minimum 12 dérivations [21] : 6 dérivations frontales et 6 dérivations précordiales.

2.4.3 Retranscription

Les dérivations ECG sont conçues de sorte qu'une déviation positive soit enregistrée dans une dérivation si une onde de dépolarisation se propage vers le pôle positif de cette dérivation.

2.4.3.1 Dérivations frontales

Les dérivations frontales sont formées par les électrodes du plan frontal posées. Elles se composent de 2 types de dérivations : bipolaires et unipolaires (Figure 13).

2.4.3.1.1 Dérivations bipolaires

Les dérivations bipolaires sont au nombre de 3 et chacune mesure une différence de potentiel entre 2 électrodes :

- DI : différence de potentiel entre le bras droit et le bras gauche.
- DII : différence de potentiel entre le bras droit et la jambe gauche.
- DIII : différence de potentiel entre le bras gauche et la jambe

Ces dérivations sont représentées selon Einthoven par un triangle équilatéral dont le centre est occupé par le cœur.

2.4.3.1.2 Dérivations unipolaires

Les dérivations unipolaires enregistrent la différence de potentiel entre l'électrode exploratrice et l'électrode neutre de la jambe droite, obtenue par l'artifice du Central Terminal de Wilson.

Elles sont également au nombre de 3 :

- aVR : Potentiel absolu du bras droit.
- aVL : Potentiel absolu du bras gauche.
- aVF : Potentiel absolu de la jambe gauche.

La position de chaque électrode est facilement repérée sur un cercle qui permet de déterminer les angles de ces axes par rapport à la ligne horizontale.

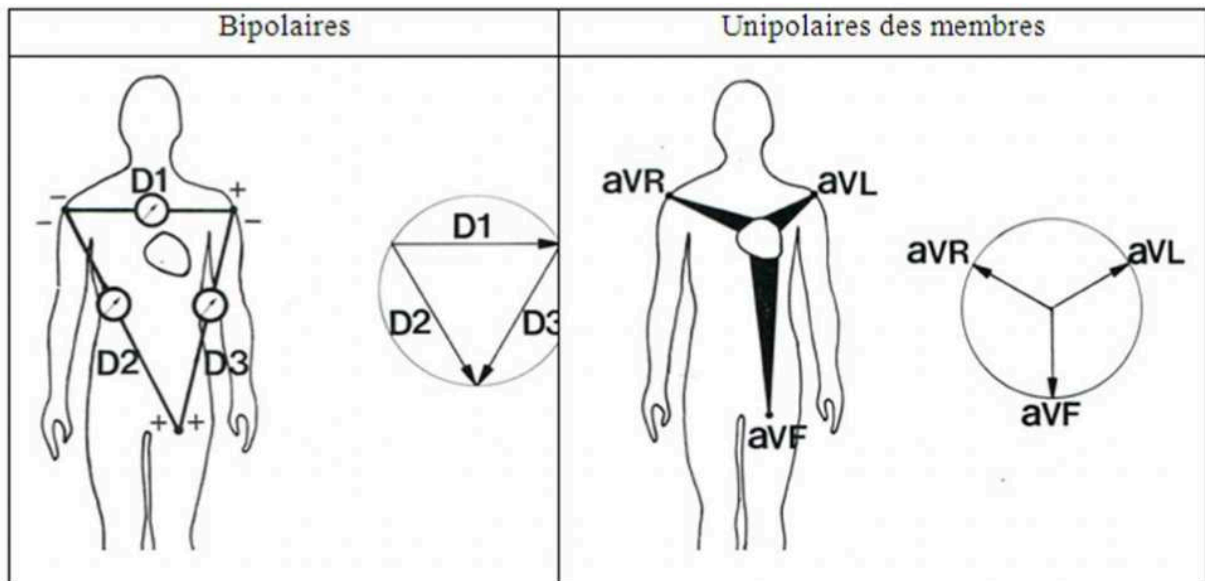


Figure 13 : Les dérivations frontales (du Collège National des Enseignants de Cardiologie et Maladies Vasculaires [22])

2.4.3.2 Dérivations précordiales

Toutes les dérivations sur le plan horizontal ou précordial sont des dérivations unipolaires. Elles enregistrent le potentiel absolu du point à partir de chaque électrode précordiale posée, de V1 à V6.

2.4.3.3 Les dérivations postérieures et inférieures

Les dérivations postérieures sont utiles devant toute suspicion d'IDM postérieur. Elles sont obtenues à partir des électrodes V7, V8 et V9 qui remplacent respectivement les électrodes V4, V5 et V6.

Les dérivations inférieures sont utiles pour la suspicion d'IDM inférieur et sont enregistrées à l'aide des électrodes supplémentaires V3R et V4R.

2.4.4 Correspondance anatomique des dérivations de l'ECG

L'ensemble des électrodes crée un rapport tridimensionnel de l'activité électrique cardiaque, et chaque dérivation fournit des informations sur une partie du cœur [22].

On distingue des correspondances entre certaines dérivations et des parties du cœur :

- Les dérivations antéro-septales : V1, V2 et V3 qui explorent la paroi antérieure du ventricule gauche et le septum interventriculaire ;
- La dérivation apicale : à partir de l'électrode V4 ;
- Les dérivations latérales : D1, aVL pour la partie latérale haute et V5 et V6 pour la partie basse ;
- Les dérivations inférieures ou diaphragmatiques : D2, D3 et aVF pour la face inférieure du ventricule gauche ;
- Et les dérivations postérieures : V7, V8 et V9 pour la face basale et inférieure du ventricule gauche.

Le ventricule droit est exploré par les électrodes V1, V2, V3R et V4R.

A partir des dériviations, on pourra définir aussi l'axe électrique du cœur en fonction de la plus grande positivité du complexe QRS. Il est considéré normal chez l'adulte, s'il se situe entre -30° et $+100^\circ$ (Figure 14).

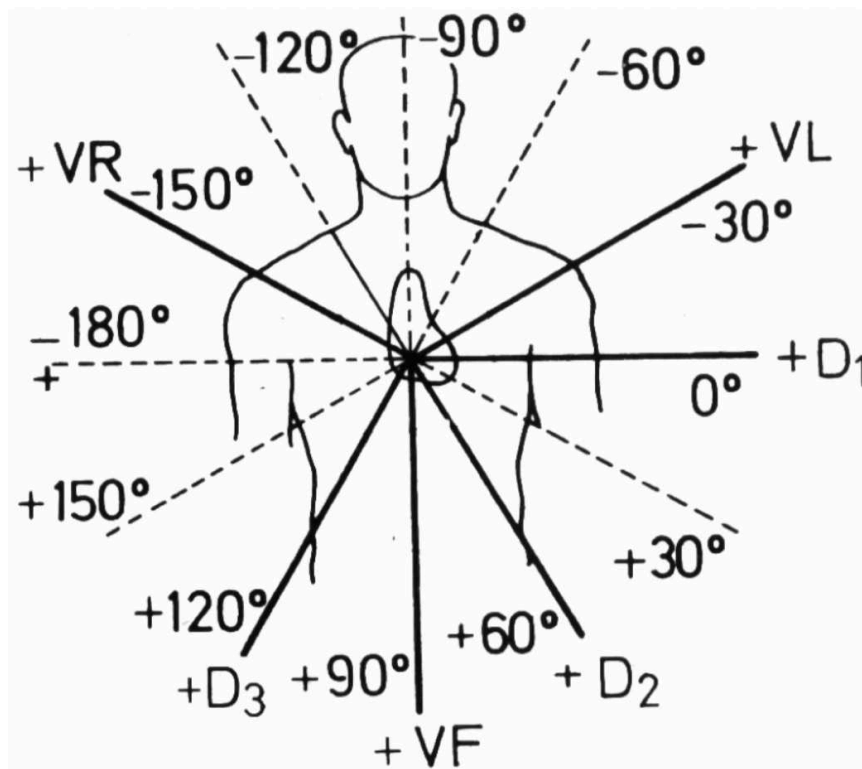


Figure 14 : Triaxe de Bailey (d'après le CNEC [22])

2.4.5 Interprétation de l'ECG

2.4.5.1 Le tracé de l'ECG

L'ECG doit être lu d'une manière complète et systématique et remis dans son contexte. Sa fiabilité et son faible coût en font un examen incontournable. Toutefois, son interprétation est parfois délicate et suppose des bases solides en électrocardiographie.

La lecture de l'ECG se fait classiquement après acquisition et transcription des signaux électriques sur du papier millimétré. Ce papier est composé de petits carrés de 1 mm de côté et de grands carrés de 5 mm (Figure 15). Le déroulement temporel du papier est habituellement de 25 mm/s. L'amplitude des signaux se mesure en millimètres et 1 mm correspond à 0,1 mV. Une calibration automatique en début de tracé confirme que la bonne échelle est sélectionnée pour mesurer le voltage des signaux.

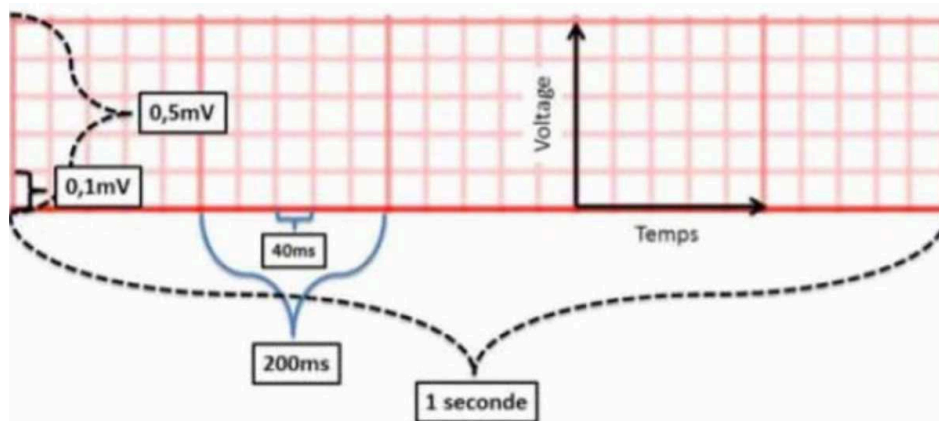


Figure 15 : Papier millimétré utilisé pour l'enregistrement de l'ECG. Échelles de temps et de voltage. (Du Pr Christophe Scavée[23])

2.4.5.2 La lecture de l'ECG

L'ensemble du processus de dépolarisation et de repolarisation est représenté sur l'ECG (Figure 16). Les événements individuels sont représentés sous forme de pointes et d'ondes représentant une partie spécifique du cycle de conduction cardiaque. Cette représentation visuelle du système de conduction permet d'analyser l'activité électrique du cœur [20] :

- L'onde P représente la dépolarisation des oreillettes.
- Le segment PR correspond à la durée de transmission de l'impulsion électrique des oreillettes aux ventricules.
- Le complexe QRS représente la dépolarisation des ventricules.
- L'onde T montre la repolarisation des ventricules.
- L'intervalle QT explore la durée de la repolarisation ventriculaire. Il dépend de la fréquence cardiaque selon la formule de Bassett.
- Enfin l'intervalle RR permet de calculer la fréquence cardiaque.

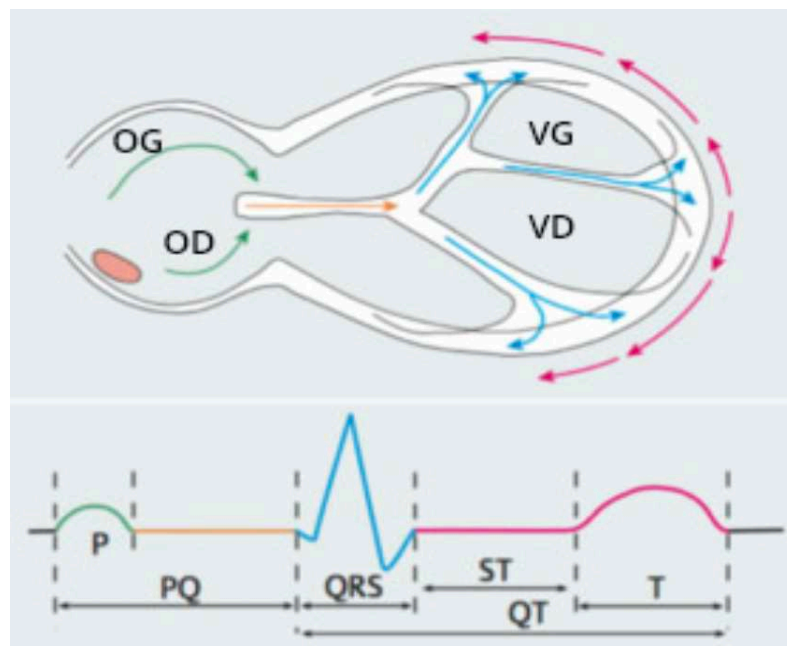


Figure 16 : Cheminement d'une impulsion électrique correspondant aux pointes et aux ondes sur un ECG (de Trappe [24])

2.4.5.3 L'analyse

Une analyse électrocardiographique nécessite l'évocation de ces 12 éléments :

- Mesure de la fréquence cardiaque.
- Déterminer l'origine du rythme : un rythme est sinusal si chaque complexe QRS est précédé par une onde P et chaque onde P est suivie par un complexe QRS. L'onde P doit être positive en DI, DII et aVF, négative en aVR, biphasique en V1.
- Aspect, durée et hauteur de l'onde P.
- Mesure de la largeur et hauteur du QRS.
- Analyse de l'axe du QRS et de son voltage.
- Mesure de l'intervalle PR, QT.
- Analyse dans les dérivations précordiales de la progression de l'onde R.
- Onde Q anormale témoignant d'un infarctus ancien.
- Aspects et anomalies du segment ST.
- Aspects et anomalies de l'onde T.
- Présence d'une onde U en fin de repolarisation.
- Présence d'une stimulation électrique artificielle.

Les valeurs de chaque onde et intervalle permettent de dépister certaines anomalies électrocardiographiques du patient. Le Tableau 1 présente les valeurs normales [25] :

Tableau 1 : Résumé des valeurs normales (d'après [25])

Onde, intervalle	Valeurs normales
Fréquence cardiaque (FC)	60-100bpm
Durée de P	< 120ms
Axe de P	60° (D2)
Amplitude de P	< 2,5mm (en D2)
PR	120-200ms
Durée de QRS	80-100ms, en pratique 80-120ms
Axe de QRS	-45 à +110°, en pratique -30 à +90°
Onde Q physiologique	< 1/3 amplitude QRS et < 40ms de durée
QT	< 440ms à 60bpm

2.5 Intérêt diagnostique

Les pathologies cardiaques détectées grâce à l'ECG sont multiples. Les principales sont les suivantes [25,26] :

- Les altérations du signal électrique et troubles de conduction intra cardiaque,
- Les troubles de rythme,
- La maladie coronaire,

- Les altérations de la paroi cardiaque : hypertrophie du myocarde, péricardite, myocardite.

Annexe 3 – Pathologies cardiaque détectées par l'ECG.

2.6 Place de l'ECG en soins primaires

2.6.1 Prévention primaire

2.6.1.1 Facteurs de risque cardio-vasculaires

Ils constituent un risque de survenue d'une maladie cardio-vasculaire (CV). On en distingue 2 types :

- Les risques non modifiables : genre masculin, âge et antécédents d'accident CV,
- Et les risques modifiables : hypertension artérielle (HTA), diabète et dyslipidémie, tabagisme, inactivité physique, alimentation déséquilibrée, utilisation nocive de l'alcool et surpoids.

En 2014, l'étude française ECOGEN relevait que les facteurs de risques CV représentaient le second motif (13%) de consultation en médecine générale [27].

2.6.1.2 Dépistage

Les soins primaires ont un rôle incontournable pour dépister les facteurs de risques lors d'une consultation, grâce à l'examen clinique et paraclinique (prise de sang, ECG...) [28].

En 2015, la prévalence de l'obésité était estimée à 17% parmi les adultes de 18 à 74 ans. Chez les enfants de 6 à 17 ans, la prévalence du surpoids était estimée à 13% et celle de l'obésité à 4%. Enfin, 32% des français de 18-75 ans fumaient du tabac en 2018 [29].

2.6.1.3 Prise en charge thérapeutique

Plus de 7,2 millions de personnes recevaient un traitement médicamenteux en prévention primaire (HTA, dyslipidémie) en France en 2018 [30].

La prévalence des patients atteints de diabète traités pharmacologiquement en 2019 était estimée à 5,2% de la population, soit 3,5 millions de personnes. Quant aux patients atteints d'HTA, leur nombre était estimé la même année à 10,2 millions de sujets traités [29].

2.6.1.4 Le suivi

L'organisation de soins et de suivi sont pluridisciplinaires.

Entre 2007 et 2008, 93% des diabétiques étaient traités par le médecin généraliste (MG) et 20% étaient suivis par un diabétologue [31]. Parmi les hypertendus, 92% étaient suivis par le MG et 8% par le cardiologue libéral.

Pour les patients atteints de dyslipidémie en prévention primaire, la prescription d'un traitement hypolipémiant était établie par le MG dans 88% des cas et par le cardiologue dans 7% des cas [29].

2.6.2 Prévention secondaire

2.6.2.1 Maladies CV

En France, les maladies CV représentent la deuxième cause de décès [29] avec plus de 140 000 morts chaque année [32].

Aux premiers rangs des maladies CV létales se trouvent les infarctus du myocarde (IDM) et les accidents vasculaires cérébraux (AVC). Ces pathologies représentent les premières causes de décès dans le monde. En 2017, 17,8 millions des décès seraient imputable aux maladies CV, soit 32 % de tous les décès dans le monde, dont 7,8 millions qui seraient liés aux cardiopathies coronariennes et 6,7 millions aux AVC [28,33,34].

2.6.2.2 Prise en charge thérapeutique

En 2018 en France, 4,1 millions de patients étaient traités pour une maladie cardio-neuro-vasculaire, dont plus de 360 000 pour maladie aiguë [30]. Au total, plus de 15 millions de personnes sont prises en charge pour des maladies ou des risques CV [35].

2.6.2.3 Suivi

En 2004, d'après la Direction de la Recherche, des Études, de l'Évaluation et des Statistiques (DREES), 26 % des motifs de consultations en médecine générale, tout âge confondu, sont consacrés aux maladies CV [36].

Les pathologies CV représenteraient chez les patients de plus de 70 ans, 33,6 % des consultations totales et 7,7 % des entrées dans les services d'urgence. Certaines pathologies imposent un bilan à l'hôpital mais le MG reste un maillon incontournable. Il pose un premier diagnostic et oriente le patient vers le spécialiste ou le service d'urgence.

2.7 Électrocardiographie dans la pratique médicale

2.7.1 Modalités et indications

2.7.1.1 ECG conventionnel

2.7.1.1.1 Prévention

L'ECG est effectué systématiquement dans les cas suivants :

- Bilans de santé proposés par l'assurance maladie dans les centres de santé,
- Aptitude professionnelle,
- Aptitude sportive : l'ECG est recommandé par la Société Française de cardiologie, à partir de 12 ans, tous les 3 ans jusque 20 ans puis tous les 5 ans [37],
- Bilan préopératoire après 40 ans chez l'homme et après 50 ans chez la femme,
- Enquêtes familiales pour certaines cardiopathies héréditaires.

2.7.1.1.2 Dépistage

L'ECG est réalisé de façon annuelle chez les patients ayant des facteurs de risque CV [21]. L'HTA représente 17% des consultations de médecine générale [38], et jusqu'à

24% pour les patients de plus de 70 ans. La dyslipidémie et le diabète concernent plus de 9% des consultations.

Il est effectué en présence des symptômes suivants :

- Douleurs thoraciques ou épigastriques,
- Palpitations,
- Difficultés respiratoires aiguë ou chronique,
- Malaise, perte de connaissance, syncope ou mort subite.

Mais aussi devant une confusion ou une démence chez la personne âgée ainsi qu'une angoisse.

2.7.1.1.3 Suivi

L'ECG est indispensable lors d'un bilan initial devant une pathologie cardiaque avérée telle que l'IDM ou lors du suivi devant d'autres pathologies telles que :

- Suivi du diabète
- Prise de certains médicaments,
- Maladie pulmonaire,
- Ou déséquilibres hydroélectrolytiques.

2.7.1.2 Méthode de Holter

L'ECG est enregistré avec 2 à 12 dérivations simultanées sur une durée de 24 à 96 heures, sur un support numérique. L'analyse est faite en différé.

Cet enregistrement permet :

- Une évaluation des malaises, syncopes et pertes de connaissance ou de palpitations épisodiques lorsque l'ECG standard n'aide pas au diagnostic et lorsqu'il y a une probabilité que les symptômes se répètent,
- De faire le diagnostic de dysfonction sinusale avec une grande sensibilité
- Une évaluation de l'efficacité thérapeutique des médicaments bradycardisants,
- Une surveillance ou réglage des pacemakers et défibrillateurs,
- Et une évaluation du risque rythmique comme des salves de tachycardies ventriculaires asymptomatiques après infarctus ou dans les myocardiopathies.

2.7.1.3 Monitoring ECG

Le plus souvent, il est effectué à l'aide de quatre électrodes avec affichage continu en mono piste.

Il est réalisé :

- Dans les situations d'urgence ou de réanimation et lors des transferts médicalisés,
- En surveillance aux soins intensifs cardiologiques,
- En per et post-opératoire,
- Et pendant les exercices de réadaptation des cardiaques.

2.7.1.4 Méthodes de longue durée

L'ECG est effectué en ambulatoire, sur une longue durée (jusqu'à 21 jours) avec 2 ou 3 dérivations. C'est la même utilisation que l'Holter qui est insuffisant lorsque les symptômes sont très espacés.

Il est aussi utilisé pour le diagnostic étiologique de syncopes inexplicables, via un moniteur électrocardiographique implantable (Reveal®) pour un suivi jusqu'à 3 ans.

2.7.1.5 ECG d'effort

Un ECG d'effort mesure l'activité électrique du cœur, la pression artérielle et le rythme cardiaque sur 15 à 30 minutes.

Il permet de dépister une coronaropathie ou de quantifier l'intensité de l'activité physique possible en cas de pathologie cardiaque.

2.7.1.6 Autres formes d'ECG conventionnels

Il existe de nouvelles modalités technologiques telles que l'ECG portable, la tablette digitale, des montres digitales, les smartphones...

2.7.2 Épidémiologie

2.7.2.1 En urgence

En 2004, la DREES (direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques) note que 5% des recours urgents à la médecine générale correspondent à des urgences somatiques critiques, dont 23% nécessitent la prescription d'un ECG. Le recours à l'ECG pour les médecins urgentiste de ville est d'environ 7% [39].

En cas de besoin urgent d'ECG, les MG non équipés orientent 62% des patients vers un service d'urgences, et 35% vers un cardiologue [40].

2.7.2.2 L'ECG en médecine générale et en soins primaires

En France, 49% des MG seraient dotés d'un ECG, dont 58% avec interprétation automatique [41].

En 1990 en Angleterre, 40 % des MG ont utilisé l'ECG au moins une fois par mois et 43 % l'ont utilisé devant une suspicion d'IDM à domicile. Mais dans 20 % des cas, le diagnostic d'IDM était erroné [42].

En 2009 aux USA, l'AAFP note un taux d'équipement des MG de 94 % [40], dont 25% avec interprétation automatique.

Cet équipement se retrouve au premier rang des dispositifs médicaux équipés de l'intelligence artificielle [43]. Les MG sont en attente de modules leur permettant de poser un diagnostic en situation d'urgence, notamment dans les domaines où ils manquent de compétences, et en l'absence de spécialiste ou de service d'urgence à proximité [43].

2.8 Interprétation visuelle de l'ECG

2.8.1 Profil des médecins généralistes

2.8.1.1 Caractéristiques

La moyenne d'âge des praticiens utilisant l'ECG est de 50 ans, avec en moyenne 29% de femme et 71% d'homme. Les études françaises ont dans l'ensemble un profil de recrutement semi-rural [40,41], en situation d'urgence et loin d'un cardiologue ou d'un service d'urgences.

2.8.1.2 Formation initiale

90% des MG qui ont recours à l'ECG ont acquis une formation universitaire ou lors d'un stage hospitalier, 6% en formation continue, 44% par des livres et 25% sur internet [44].

En moyenne 50% des MG ont une orientation particulière. Parmi eux, environ 26 % ont une capacité ou DESC de Médecine du sport, 10 % un DESC d'urgence ou SAMU et 21 % ont une autre pratique [45].

2.8.1.3 Confiance

Morin et al. relève que 66 % des MG disent ne pas être suffisamment formés à la lecture et l'interprétation des ECG [45].

2.8.2 Interprétation visuelle

2.8.2.1 Interprétation erronée

L'interprétation visuelle comporte un risque d'erreur qui peut aller jusqu'à 33% [46].

Une enquête transversale au Leeds (USA), utilisant un questionnaire dans un service de cardiologie notait que 23% des ECG anormaux ont été interprétés comme normaux par les cliniciens en soins primaires contre 1 % par les cardiologues [47].

2.8.2.2 Interprétation variable selon la pathologie

Dans la littérature [48], la précision de l'interprétation d'ECG concernant l'IDM ST+ varie entre 79 % [49] et 87 % à 100 % [50].

Dans les cas d'arythmie, la précision varie de 93 % [51] à 71% [49].

Ces pathologies constituent la majorité des admissions à l'hôpital.

2.8.2.3 L'apport d'une formation

Une grande méta analyse assez récente [52] concernant la précision dans l'interprétation de l'ECG par les médecins. Les scores de précision variaient considérablement d'une étude à l'autre, allant de 4% à 95% avec une médiane à 54%.

Ces scores évalués après une formation étaient légèrement plus élevés. Ils restaient faibles avec une médiane à 67%. Même les cardiologues présentaient des écarts de performance, avec une précision combinée de 74,9% [49% à 92%].

On note également un déclin rapide des compétences d'interprétation de l'ECG chez les étudiants en médecine de premier cycle [53].

2.8.3 Courbe d'apprentissage

2.8.3.1 American College of Cardiology et American Heart Association (ACC-AHA)

L'énoncé de compétence clinique en électrocardiographie de l'ACC-AHA [54] note qu'un minimum de 500 ECG est requis sur une période de 12 mois pour atteindre une compétence d'interprétation de l'ECG. Pour maintenir cette compétence, l'interprétation d'au moins 100 ECG par an est recommandé.

Pour la formation du groupe de travail 3 du COCATS 4, ce serait plus de 3 000 en 36 mois pour arriver une expérience suffisante [55].

Un format plus intensif sur un temps plus court est proposé avec l'interprétation de 200 ECG par jour sur une période de 1 à 3 mois [56].

En pratique, le nombre médian d'ECG réalisés par mois était de 5 pour les MG et 200 pour les cardiologues [41].

2.8.3.2 Études controversées

Ces méthodes de formation sont remises en cause par des auteurs [48,50,57] qui suggèrent que l'expertise de l'interprétation d'ECG est indépendante de la durée de formation et du nombre d'ECG interprétés [49].

On note la présence d'une différence significative concernant différents formats d'enseignement sur la compétence d'interprétation de l'ECG [58].

2.8.4 Nouvelles approches de formation

Ces résultats suggèrent que de nouvelles approches de formations sont nécessaires : on en cite des méthodes d'évaluation approuvées par des sociétés professionnelles [59], ou encore l'utilisation créative d'ateliers [60], de groupes de pairs [61], d'auto-apprentissage en ligne [62], ou de médias sociaux [63].

Il semble que le facteur le plus important pour déterminer la performance d'interprétation de l'ECG ne soit pas le format d'apprentissage, mais la forme d'évaluation. Deux études notent que l'évaluation sommative améliore considérablement la performance de l'interprétation de l'ECG par rapport à l'évaluation formative [61,64].

On retrouve également des études qui soulignent l'impact disparate des différentes stratégies cognitives sur l'apprentissage et l'interprétation de l'ECG [65,66].

Plus récemment, une étude portant sur l'apport du profilage de l'eye tracking capturé pendant l'interprétation d'ECG qui pourrait améliorer la compétence à interpréter l'ECG [67]. 75% des étudiants auraient amélioré leur capacité d'interprétation de l'ECG après avoir utilisé le suivi oculaire.

3 Interprétation automatisée de l'ECG

3.1 Définition

L'interprétation automatisée de l'ECG est produite par différents algorithmes. Ces algorithmes génèrent automatiquement un diagnostic lors de l'impression de l'ECG [68].

Elle se base sur des approches mathématiques et statistiques qui donnent aux ordinateurs la capacité d'améliorer leurs performances à résoudre des tâches sans nécessairement être programmés pour chacune de ces tâches [69].

L'interprétation automatisée de l'ECG a été introduite pour améliorer l'interprétation de l'ECG et faciliter la prise de décision en matière de soins de santé. Cette interprétation relève de l'intelligence artificielle.

3.2 L'intelligence artificielle

Le concept d'intelligence artificielle (IA) est attribué à Alan Turing. Initiateur du concept de « machine universelle » en 1936, qui est à la base des ordinateurs d'aujourd'hui [70].

L'IA se base sur des algorithmes [71] représentant un champ d'étude défini. On en décrit trois niveaux principaux [72] :

3.2.1 1^{er} niveau

Le premier niveau est l'*Artificial Narrow Intelligence* ou l'IA mono activité.

La machine exécute une opération en fonction des informations programmées et des règles énoncées par un expert.

On appelle moteur d'inférence le mécanisme de raisonnement qui permet de déduire une action au regard de la base de faits et de la base de règles.

3.2.2 2^e niveau

Le 2^e niveau correspond à l'*Artificial General Intelligence* ou l'IA capable de résoudre des problèmes variés.

La machine est programmée pour être capable de déduire des règles à partir d'expériences annotées par des humains, d'apprendre d'elle-même depuis ces expériences. Ces expériences annotées constituent la base d'apprentissage.

Cet apprentissage par la machine s'appelle le *machine learning*, on parle également de logiciels auto-apprenants.

3.2.3 3^e niveau

Enfin, le 3^e niveau est l'*Artificial Super Intelligence* ou l'IA ayant des capacités analogues à celles de l'espèce humaine.

Ce niveau hypothétique consisterait en une machine dotée d'intelligence forte, qui serait capable de s'adapter à n'importe quelle situation, même inédite.

Ce niveau d'IA relève à ce jour de la science-fiction.

3.3 Les fondamentaux de l'interprétation automatisée de l'ECG

3.3.1 Historique

Les premières tentatives d'automatisation de l'analyse de l'ECG remontent à la fin des années 1950 [73]. Il était possible de convertir le signal analogique de l'ECG en forme numérique.

Dans les années 1960, ces signaux numérisés ont permis le développement d'algorithmes qui interprètent l'ECG par l'ordinateur. Ensuite, les algorithmes ont été continuellement mis à jour et améliorés.

3.3.2 Principes

Ils concernent la conception, l'analyse, l'optimisation, le développement et l'implémentation des systèmes d'IA. Il existe 4 phases principales qui composent l'algorithme utilisé par l'interprétation automatisée de l'ECG [74,75]:

- **Acquisition du signal** : le signal s'obtient par conversion des signaux analogiques en signaux numériques et filtrage pour éliminer le bruit et les artefacts indésirables.
- **Analyse du signal** : cette analyse récolte des mesures qui décrivent les différentes caractéristiques des formes des ondes de l'ECG comme leurs amplitudes et leurs durées sur les 12 dérivations.
- **Extraction des caractéristiques et agrégation** : cette phase consiste à calculer des mesures agrégées tenant compte à la fois de nombreuses dérivations et de nombreux cycles cardiaques, telles des moyennes, des écarts types, un axe électrique, etc.
- **Interprétation** : l'interprétation en termes de diagnostics peut être réalisée notamment à l'aide de règles expertes ou de *machine learning*.

3.3.3 Complexité des programmes d'interprétation de l'ECG

Après extraction des caractéristiques du signal, il existe une classification effectuée par l'algorithme (Figure 17) pour détecter si le signal est normal. Les résultats varient selon les algorithmes utilisés [76].

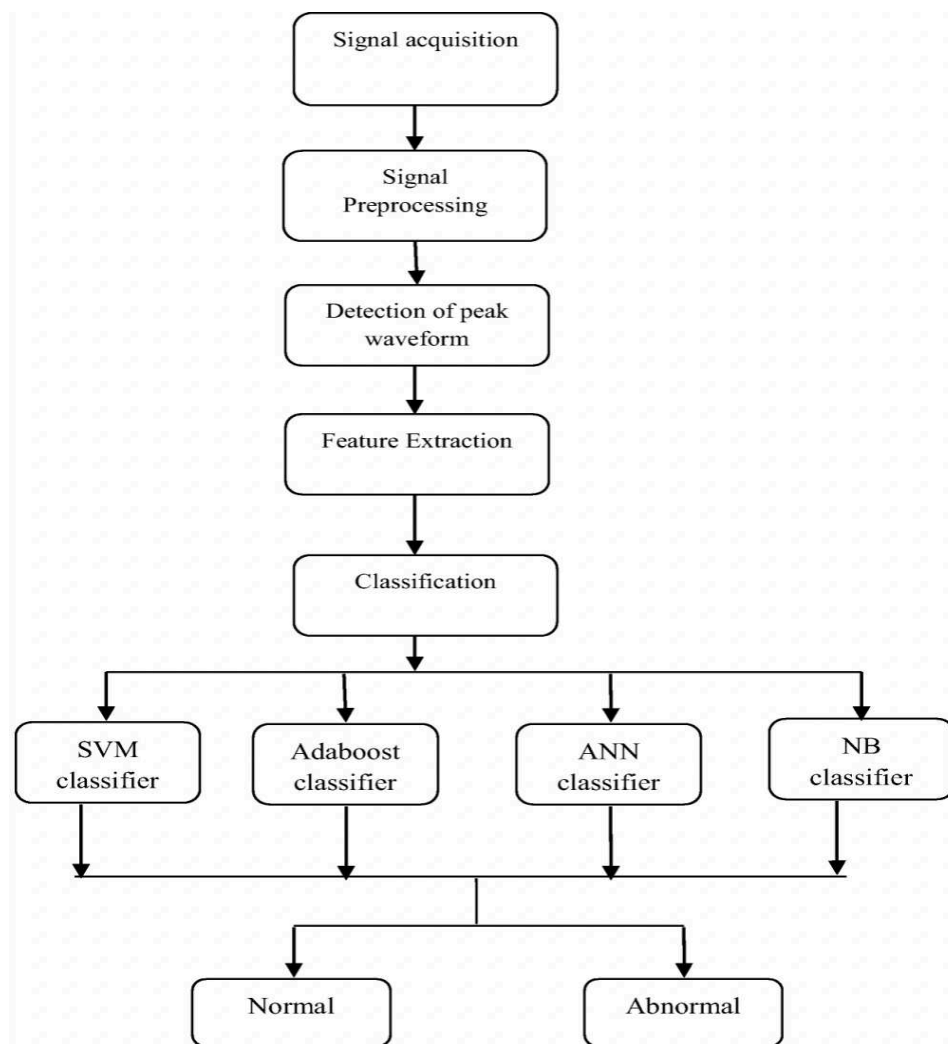


Figure 17 : Exemple de Diagramme proposé pour son étude par S. Celin [76]

Les phases 1 à 3 sont étudiées depuis les années 1950 et fonctionnent de manière acceptable depuis les années 1980 [74,77]. Mais le diagnostic final ou l'interprétation, à ce jour, reste imprécis et très variable selon l'algorithme utilisé [75].

Les algorithmes d'interprétation d'ECG à 12 dérivations disponibles aujourd'hui sont très complexes et complets. En effet, ils varient considérablement à la fois en termes d'architecture et de fonctionnalité. Dans de nombreux cas, les détails de leur fonctionnement sont exclusifs et ne sont pas divulgués.

3.4 Soins primaires

3.4.1 Épidémiologie

En France, parmi les MG dotés d'une interprétation automatisée 27.9% déclarent avoir une confiance modérée dans son résultat [41].

27,9% des MG et 8,3% des cardiologues déclarent lire l'interprétation automatisée puis interpréter l'ECG. Tandis que 69,8% des MG interprètent l'ECG puis lisent l'interprétation automatisée. En revanche, 91,7% des cardiologues déclarent interpréter l'ECG puis 52,8% d'entre eux lisent l'interprétation automatisée [41].

Dans cette même étude : tous les cardiologues avaient un diplôme universitaire en interprétation d'ECG contre 3,95% des MG en soins primaires. De plus, 63,3% des MG estiment manquer de compétences en interprétation d'ECG [41].

6% seulement des MG en France avaient une confiance absolue en l'interprétation automatisée, 65% dans le diagnostic « d'ECG normal », 26% pour les troubles du rythme et 21% pour l'ischémie aigue [41].

3.4.2 Finalités

Les médecins généralistes aimeraient que ces modules d'interprétation automatisée leur fassent gagner du temps et simplifient certaines procédures. Ils sont surtout en attente de modules leur permettant d'identifier un diagnostic urgent [43].

Les ECG de triage identifiés par l'ordinateur comme normaux sont peu susceptibles d'avoir une signification clinique. Leur élimination peut donc être un gain de temps pour le médecin [78].

3.5 Performances très différentes entre études

3.5.1 Généralités

Les premières tentatives d'automatisation de l'analyse de l'ECG remontent à la fin des années 1950 et l'on s'attendait rapidement à ce que les ordinateurs numériques jouent un rôle important dans l'interprétation de l'ECG [79].

Malgré les progrès techniques, l'utilisation clinique de l'ECG informatisé est restée initialement limitée en raison de l'absence d'accord sur les définitions des ondes et des mesures communes, sur les critères normalisés de classification et sur la terminologie des rapports.

Pour remédier à ces difficultés, des efforts visant à proposer des normes et des recommandations ont été développés, tant en Europe qu'aux États-Unis, afin d'établir une norme internationale pour l'interprétation informatisée de l'ECG [80].

Les objectifs étaient de réduire la grande variation des mesures d'ondes obtenues par les programmes informatiques, d'améliorer la classification diagnostique de l'interprétation de l'ECG [74] afin que des mesures et des résultats diagnostiques similaires puissent être obtenus indépendamment du programme informatique utilisé.

3.5.2 Performance d'analyse mitigée

3.5.2.1 Mesures d'amplitude

Les divergences dans les mesures d'amplitude sont moins fréquemment rapportées, mais il persiste une variabilité de ces mesures qui peut être responsable de différences significatives dans les mesures de tension et, par conséquent, dans les diagnostics [74,77,80–82].

3.5.2.2 Intervalles QT

Les différents intervalles et les durées de l'intervalle QT mesurés présentent des différences cliniquement faibles, mais statistiquement significatives entre les fabricants [83].

3.5.2.3 Amplitude et durée des ondes

L'interprétation utilisant la mesure précise des amplitudes et des durées de l'ECG peuvent approcher celle des lecteurs expérimentés en terme de sensibilité, de spécificité et de reproductibilité [84].

Cependant, l'interprétation qui dépend des formes d'onde et de la relation entre les formes d'onde, telles que les ondes P irrégulières, peuvent être moins précises, car l'ordinateur n'a pas les capacités de reconnaissance visuelle des formes d'onde [84,85].

3.5.2.4 Interprétation finale

Les algorithmes peuvent avoir des performances différentes lorsqu'ils sont appliqués à des signaux ECG traités par des méthodes différentes [74].

Les différences de mesure entre divers systèmes d'ECG standard peuvent être suffisamment importantes pour modifier les conclusions du diagnostic [86].

3.6 Analyse des études

3.6.1 Précision diagnostique variable

En 1991, la première évaluation a comparé les performances de 9 programmes informatiques d'électrocardiographie à celles de 8 cardiologues dans l'interprétation d'ECG [86].

Dans cette étude, la précision des programmes informatiques était inférieure de 6,6 % à celle des cardiologues. Cette étude comparative était limitée à quelques diagnostics ECG courants, tels que l'HVG et les anciens IDM.

Dans une étude réalisée en 2006, l'interprétation automatique était erronée notamment dans les arythmies, les troubles de la conduction et les rythmes des stimulateurs cardiaques [87].

Les performances de certains programmes étaient presque aussi précises que celles des meilleurs cardiologues, tandis que d'autres étaient nettement inférieures. En outre,

le degré de variabilité de la précision diagnostique entre les programmes informatiques était significativement plus élevé que celui des cardiologues [74,86].

En 2015, la précision diagnostique de l'interprétation automatisée était de seulement 35,90 % [88].

Une autre étude en 2018 concluait à la complexité de l'interprétation automatisée, qui est liée à un biais d'automatisation [89].

3.6.2 Variabilité majorée selon les pathologies étudiées

3.6.2.1 Troubles du rythme

Les performances sont variables selon les études. Elles sont inférieures pour les rythmes non sinusaux (VPP 53,5%) [90].

La spécificité est légèrement inférieure pour le diagnostic de la FA [91]. Dans d'autres études, on note une surinterprétation de la FA [92,93].

On relève également un diagnostic erroné de FA dans 11,3% des cas [93].

En revanche, une large étude réalisée [94] retrouve une performance diagnostique élevée, similaire à celle des cardiologues.

3.6.2.2 IDM

L'ECG est l'un des outils principaux initial pour diagnostiquer un IDM ST+ [95].

Mais, les algorithmes étudiés retrouvent un taux de faux positifs entre 0% et 42% et de faux négatifs entre 22% et 42 % [96].

On rapport également l'évaluation de trois algorithmes de diagnostic STEMI qui a montré des résultats faussement négatifs élevés, concernant l'identification de l'artère coronaire lésée [97].

Les raisons les plus courantes de l'interprétation incorrecte des algorithmes de STEMI étaient les artefacts et les causes non ischémiques de l'élévation de ST, telles que la repolarisation précoce [98].

3.6.2.3 Piles cardiaques

L'erreur d'interprétation des rythmes de stimulateurs cardiaques peut aller jusqu'à 75% [84,89,90], mais de nombreux fabricants proposent désormais des algorithmes spécifiques pour permettre la détection des artefacts de stimulation.

3.6.2.4 Syndrome QT long

L'interprétation automatisée du syndrome du QT long n'est pas satisfaisant [99].

Il peut exister des différences dans les mesures de l'intervalle QT entre les algorithmes d'un même fabricant, d'où l'intérêt d'utiliser le même algorithme lors de la mesure de l'intervalle QT pour la surveillance ECG des patients traités [100,101].

On note une sous-estimation de ce diagnostic [101,102].

3.6.2.5 Sportifs

L'interprétation automatisée réalisée chez les footballeurs professionnels montre deux fois plus d'ECG anormaux qu'avec l'interprétation visuelle [103].

Cela fait suggérer l'ajustement des valeurs de référence dans ce contexte.

3.6.3 Perspectives d'amélioration

Aucune méthode d'enseignement ne semble la plus efficace pour l'acquisition des compétences d'interprétation de l'ECG [104]. Cependant, des évaluations répétées augmentent à moyen terme ces compétences, quel que soit le format d'enseignement. Une formation continue sur l'ECG, associée à des examens appropriés, devrait également être dispensée au niveau post-gradué [105].

L'interprétation automatisée de l'ECG peut réduire le temps d'analyse de 24 à 28 % pour les lecteurs expérimentés [80]. Cependant, le temps de lecture pour un lecteur expérimenté est très faible : 1 minute en moyenne [106].

De plus, les archives informatisées permettent un accès rapide aux comparaisons d'ECG. En plus d'indiquer les différences entre les ECG, cela améliore la précision de l'interprétation [107].

La normalisation des algorithmes et l'uniformisation des critères de diagnostic ont été proposées [108]. Cela conduirait à une uniformité mondiale de l'interprétation de l'ECG.

Hormis les directives recommandées liées à l'interprétation de l'ECG, l'approche alternative serait de collaborer avec un service externe et centralisé d'interprétation d'ECG [46].

4 Objectif

La revue de différentes études réalisées ces dernières années sur l'interprétation de l'ECG montre une augmentation de l'intérêt bibliographique pour ce champ (2.7.2.2), et une diversification des algorithmes utilisés (3.5).

En revanche, on note une grande disparité des résultats obtenus (3.6) dans ces études, et une méfiance des utilisateurs [109], suggérant que les évaluations publiées pourraient pâtir de biais.

L'objectif de ce travail est d'identifier d'éventuels biais récurrents dans les études portant sur la validation d'interpréteurs automatisés d'ECG, et de rechercher un lien entre la présence de ces biais et des facteurs identifiables.

Article en Anglais

1 Introduction

Cardiovascular diseases are the first cause of death in the world [28]. Their risk factors represent the second most common reason for consultations with general practitioners (GPs) in France [27].

The electrocardiograph is a fundamental tool in the detection and monitoring of cardiovascular diseases [110]. The proportion of GPs equipped with ECGs with automated interpretation modules has increased from 29% in 2016 [41] to 37% in 2021 [111]. It is the most isolated GPs who are equipped with such automated devices [41]. However, the more qualified physicians are to read ECGs, the more distrustful they are of these automated interpreters [41].

Automated electrocardiogram (ECG) interpretation relies on artificial intelligence modules. These algorithms automatically generate a diagnosis when the ECG is printed [68]. Automated ECG interpretation was introduced with the aim of improving the accuracy of ECG diagnosis, saving time, and optimizing therapeutic decisions in patient management.

The first attempts to automate ECG analysis date back to the late 1950s [73], and this work is still ongoing. The production of an ECG and its automated interpretation follow four phases [74,75] :

- **Signal acquisition**, a phase unchanged by automated interpretation
- **Signal analysis**, which corresponds to the decomposition of the signal into waves (P, Q, R, S, T...) and the calculation of intervals and amplitudes in dozens of cardiac cycles, generally on 12 leads
- **Feature extraction and aggregation**, which corresponds to the calculation of aggregated metrics and no longer detailed by cycle and by lead
- **Automated interpretation**, which allows the production of diagnoses. This interpretation is based on expert rules (logical-symbolic AI) or on machine learning (self-learning AI).

The first 3 phases have been working in an acceptable way since the 1980s [74,77], but the final interpretation remains imprecise and variable quality depending on the algorithm used [74,75,86].

In recent years, the number of published articles studying the final interpretation resulting from the different algorithms used by the ECG has increased. A disparity in the results obtained is observed according to the pathologies [75,89–93,95–97,99–102] :

- for amplitude measurements [74,77,80–82].
- for QT intervals [83].
- for amplitude and duration of waves [84,85].
- for the diagnosis of left ventricular hypertrophy and former myocardial infarction [87].
- For the diagnosis of arrhythmias and conduction disorders [88,112].

The reliability of the automated interpretation varies notably according to the presence of other associated electrocardiographic disorders [98], pacemakers [84,89,90], or the population studied such as athletes [103].

The disparity of the results obtained in these different articles and the mistrust of certain practitioners [109], invite questions about the reliability of these automated interpreters. To our knowledge, no study to date has looked at the critical reading of published articles to identify possible biases.

The aim of this work is to carry out a critical analysis of articles reporting the evaluation of automated interpreters, to search for certain biases, to study them, and to contribute, in the long term, to the improvement of publications in this field.

2 Material and methods

2.1 Study design

This study is a critical systematic literature review of scientific papers that report an evaluation of electrocardiograms computerized interpreters (ECG-CI).

2.2 Paper inclusion

We performed systematic research on PubMed (National Library of Medicine), during a 10-year period from 2010 to 2019.

We included randomized controlled trials, cross-sectional studies, diagnostic accuracy studies and cohort studies that evaluated ECG-CI. The list of keywords used for the query related to three main themes: electrocardiogram, automated interpretation, and statistical evaluation.

The query string is displayed below:

```
("automated atrial fibrillation"[Title]) OR ("bundle branch block"[Title])  
OR ("ECG"[Title]) OR ("ECGs"[Title]) OR ("EKG"[Title]) OR ("EKGS"[Title])  
OR ("electrocardiogram"[Title]) OR ("electrocardiograms"[Title]) OR  
("electrocardiographic"[Title]) OR ("electrocardiography"[Title]) OR ("ST-  
elevation"[Title]) ) AND (("accuracy"[Title]) OR ("accurate"[Title]) OR  
("analyses"[Title]) OR ("analysis"[Title]) OR ("analyzed"[Title]) OR  
("analyzing"[Title]) OR ("assess"[Title]) OR ("assessing"[Title]) OR  
("assessment"[Title]) OR ("detection"[Title]) OR ("evaluate"[Title]) OR  
("evaluated"[Title]) OR ("evaluation"[Title]) OR ("identification"[Title])  
OR ("interpretation"[Title]) OR ("outperform"[Title]) OR  
("outperforms"[Title]) OR ("performance"[Title]) OR ("prediction"[Title])  
OR ("validation"[Title]))
```

AND

```
("algorithm"[Title]) OR ("algorithms"[Title]) OR ("artificial  
intelligence"[Title]) OR ("automated"[Title]) OR ("automatic"[Title]) OR  
("computer"[Title]) OR ("computer-interpreted"[Title]) OR  
("computerized"[Title]) OR ("device incorporated"[Title]) OR ("machine  
learning"[Title]) OR ("neural network"[Title]) OR ("program"[Title]) OR  
("programs"[Title]) OR ("software-based"[Title]))
```

AND

```
((("F1"[Title/Abstract]) OR ("F-score"[Title/Abstract]) OR  
("kappa"[Title/Abstract]) OR ("predictive value"[Title/Abstract]) OR  
("recall"[Title/Abstract]) OR ("sensitivity"[Title/Abstract]) OR  
("specificity"[Title/Abstract]))
```

AND

```
((("2010"[Date - Publication]: "2019"[Date - Publication]))
```

We then read the title of the papers, and abstracts. We tried to retrieve the full text on PubMed Central, by searching on the web, and finally, when necessary, by contacting the authors by email.

We excluded papers that were studying very rare and specific diseases, or on a very specific populations, or that were only dealing with the precise algorithm used for the signal analysis. We also excluded papers for which we were not able to retrieve the full text version.

We also included papers cited by other already included papers.

2.3 Paper annotation

2.3.1 Procedure

The papers were reviewed and annotated by 6 experts:

- Emmanuel Chazard (EC), physician, full professor of Medicine (public health, medical informatics, biostatistics)
- Pierre Balayé (PB), physician, senior registrar (public health, medical informatics, biostatistics)
- Antoine Lamer (AL), computer engineer, associate professor (medical informatics)
- Mona Djebara (MD), physician, general practitioner
- Charlotte André (CA), medical student, Master of Public Health Student
- Nahel Bernou (NB), medical student, Master of Public Health Student

All the papers were first read once, to define a first version of the annotation form. A first meeting was held with all the experts, to define the final version of the annotation form, which is provided in Annexe 4. The papers were then arbitrarily assigned, so that each paper was assigned to 3 readers, including at least 1 senior reader (EC, PB or AL), and always MD. Readers were authorized to review additional papers if they had enough time. Each reader completed the annotation form for each assigned paper, blindly from other readers, but in the same place, so that readers could interact and streamline the way they interpreted each item. MD then pooled all the answers. Each paper was finally reviewed with the 6 participants, and a final version of the form was completed for each paper, with a consensus on the annotation.

2.3.2 Criteria

For each article, readers were asked to complete a structured form by checking boxes corresponding to the identified criteria. These criteria were divided into 4 main themes: a descriptive framework and 3 main scores (Annexe 4):

- - Defective quality criteria
- - The existence of a link of interest

- - A satisfaction score.

2.3.2.1 Paper description

We identified the pathology studied (AF, STEMI, or other), the type of study (cohort or case-control), if applicable, the type of control studied (negative ECGs of the same patients, or other patients), and the gold standard (expert reading of the ECG, preexisting annotated database, diagnosis provided by another examination, or evolution of the pathology).

2.3.2.2 Quality defects

We have identified quality defects, which we have systematically researched. The list of quality defects is not exhaustive.

Some of the quality defects are methodological and may lead to selection or interpretation bias:

- Inaccurate or poor-quality gold standards
- Lack of description of inclusion or exclusion criteria
- Inclusion of a non-randomized or non-consecutive population
- Unknown or significant proportion of exclusion due to algorithm dysfunction
- Existence of exclusion to indirectly improve the performance of the algorithm (and making the controls "too pure")
- Exclusion of some subjects during the study based on the result of the interpretation (not intention to treat)
- Inconsistency between the workflow studied and the actual practice envisaged
- Prevalence of the studied pathology abnormal compared to the targeted practice
- Use of computer-simulated ECGs and not real ECGs
- Algorithm tested on its training set, in case of self-learning algorithms

Other quality flaws relate to the metrics or statistics reported:

- Lack of a contingency table
- Lack of extrinsic metrics
- Absence of confidence intervals
- Presence of extrinsic metrics despite a prevalence that is very different from the real-life prevalence
- « Accuracy » or observed concordance
- Presence of errors in reported metrics

The **quality score** is simply the number of the above defined items identified in the article.

2.3.2.3 Interest links

The **interest links score** is calculated according to the type of interest link identified in the article. The highest number is used:

- 4 points if at least one author is affiliated with the private company that produced or markets the algorithm under study
- 3 points if at least one author has received funding from the company that produced or commercializes the algorithm, or if at least one author of the article is also an author of the algorithm

- 2 points if at least one author is affiliated with or receives private funding from another private company, possibly a competitor
- 1 point if no mention is made of the absence of interest link
- 0 points if the authors explicitly mention having no interest link

2.3.2.4 Level of satisfaction

The authors' **satisfaction level** is calculated as follows:

- +2 points: the algorithm is considered very good and usable in practice. It can replace the work of humans
- +1 point: the algorithm is considered good enough to help caregivers without replacing them. It requires further research
- 0 points: the author does not take a position and his opinion is neutral
- -1 point: the algorithm is considered insufficient, but could be used in some circumstances
- -2 points: the algorithm is considered unusable in practice

2.4 Statistical analysis

Qualitative and binary variables are expressed as raw counts and percentages. In this study, quantitative variables are scores that we compute. For those scores, we will display the complete distribution as a table of counts and percentages, as well as the mean, the standard deviation (SD), and the 95% confidence intervals of the mean (CI95) calculated using the central limit theorem.

The relationship between two quantitative variables is tested using Pearson's correlation coefficient nullity test.

2.5 Regulatory framework

This study consists of a literature review, and no authorization was necessary.

3 Results

3.1 Flowchart



Figure 18 : Flowchart

The flowchart of the paper inclusion is displayed on Figure 18. The Pubmed query retrieved 104 papers. We excluded 21 papers that studied the rarest pathologies [113–133], 5 papers that studied very specific populations [134–138], and 49 papers dealing with the precise algorithmic method for the signal analysis [139–187]. We also excluded 4 papers that were not accessible [128,188–190]. We included 8 papers [93,191–197], cited by 7 previously included papers [192,193,197–201]. Among these 8 articles, only 4 full text documents were available and were included in the study. To conclude, 29 articles were analyzed in the study [93,94,97,191–198,200,202–216].

3.2 Description of the studies

Of these 29 included papers, 14 (48.3%) evaluated the ability of AI-enabled software to detect atrial fibrillation, 8 (27.6%) involved the automated detection of ST-segment elevation myocardial infarction (STEMI), and 7 (24.1%) involved other diseases.

Regarding the design of the study, 18 papers (62.1%) reported a prospective cohort, and 11 papers (37.9%) reported a case-control study.

The evaluated software was compared to various gold standards. The gold standard was the reading of the same ECG by an expert in 21 papers (72.4%), the disease progression in 8 papers (27.6%), or a previous expert analysis, retrieved from an annotated database, in 2 papers (6.9%).

3.3 Evaluation of quality defects (potential biases)

We observed the following quality defects in the studied papers (Figure 19):

- Missing contingency table (12 articles, 41.4%)
- Missing confidence interval (10 articles, 34.5%)
- Usage of the accuracy / observed agreement proportion (9 articles, 31.0%)
- Absence of extrinsic metrics (6 articles, 20.7%)
- Significant exclusions due to a non-functional algorithm (5 articles, 17.2%)
- Mediocre Gold Standard (5 papers, 17.2%)
- Inconsistent workflow (4 articles, 13.8%)
- Subjects excluded after ECG analysis (4 articles, 13.8%)
- Undocumented inclusion or exclusion criteria (3 articles, 10.3%)
- Non-random or non-consecutive inclusion of subjects (2 papers, 6.9%)
- Abnormal prevalence rate (2 papers, 6.9%)
- Publication of extrinsic metrics despite abnormal prevalence rate (2 papers, 6.9%)
- Subject exclusions leading to “too pure” controls (1 paper, 3.5%)
- Subject exclusions due to unfunctional algorithm, or undocumented exclusions (1 paper, 3.5%)
- Computation errors in reported metrics (1 paper, 3.5%)
- Inaccurate Gold Standard (0 papers).

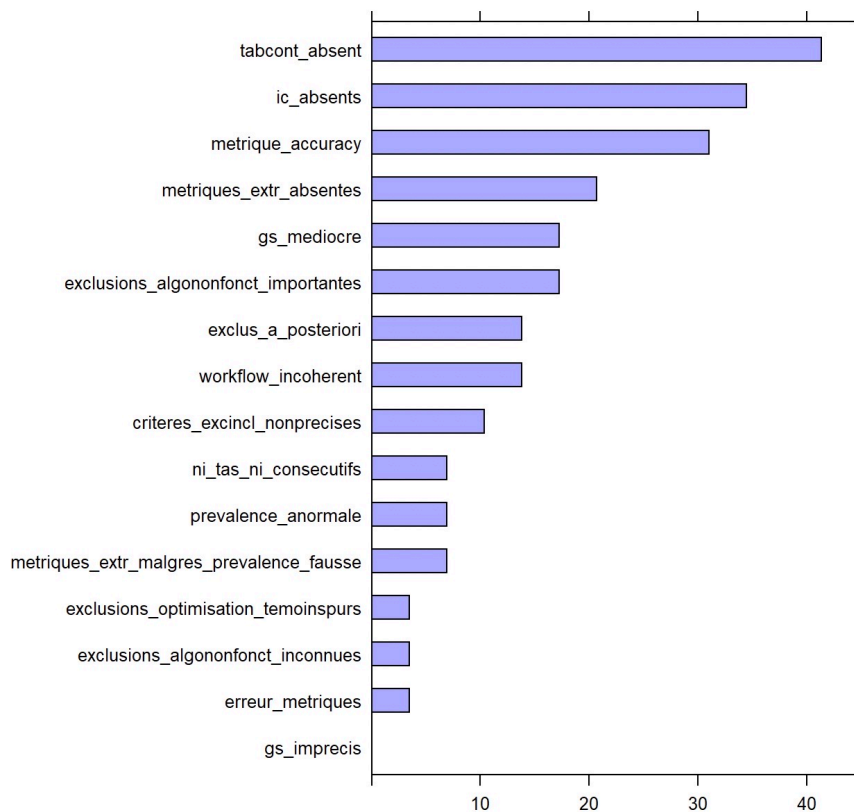


Figure 19. Prevalence of statistical and methodological quality defects among articles

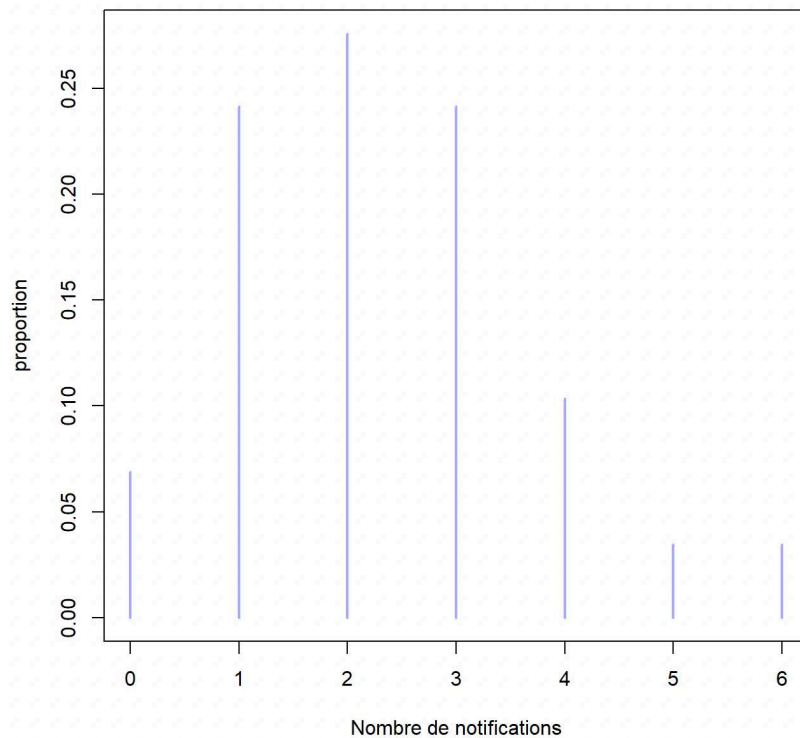


Figure 20: Distribution of quality defects from articles

Of the 16 quality defects assessed, studies had an average quality score of 2.31 (SD= 1.4, 95CI: [1.79; 2.83]), with a median of 2 (Q1-Q3: [1; 3]) (Figure 20).

3.4 Interest links score

The interest link score was computed: 11 papers (37.9%) got 4 points, 9 papers (31.0%) got 3 points, 4 papers (13.8%) got 2 points, 2 papers (6.9%) got 1 point, and 3 papers (10.3%) got 0 points. The mean interest link score was 2.79 (SD=1.3, 95CI: [2.31; 3.27]) (Figure 21). The median score was 3 (Q1-Q3: [2; 4]).

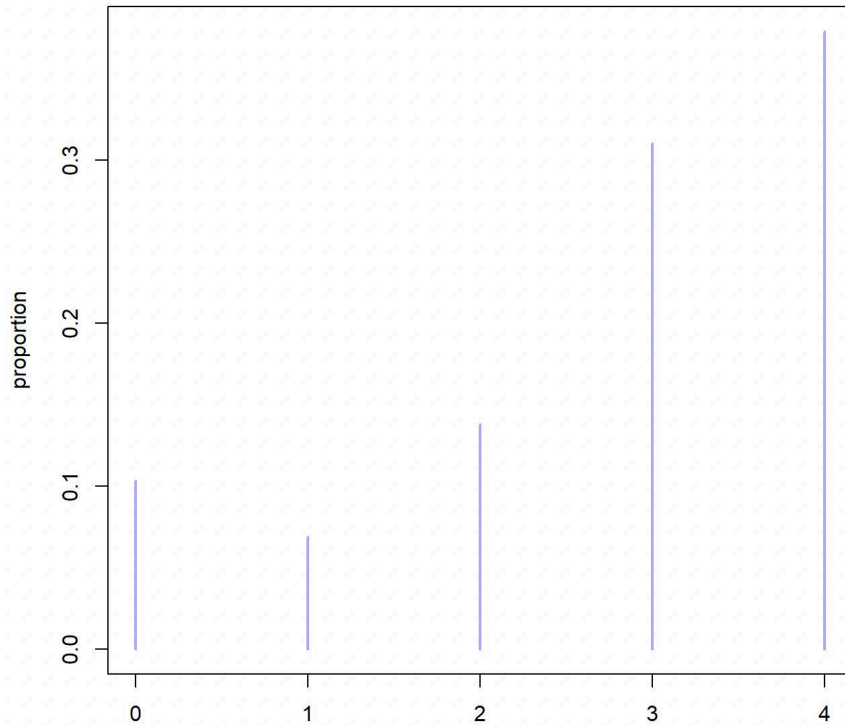


Figure 21 : Distribution of the interest link score

3.5 Satisfaction score

For the satisfaction score, 7 papers (24.1%) got 2 points, 14 papers (48.3%) got 1 point, 4 papers (13.8%) got 0 points, 3 papers (10.3%) got -1 point, and 1 paper (3.5%) got -2 points. The average author satisfaction score was 0.79 (SD=1.05, 95CI: [0.41; 1.17]) (Figure 22). The median score was 1 (Q1-Q3: [0; 1]).

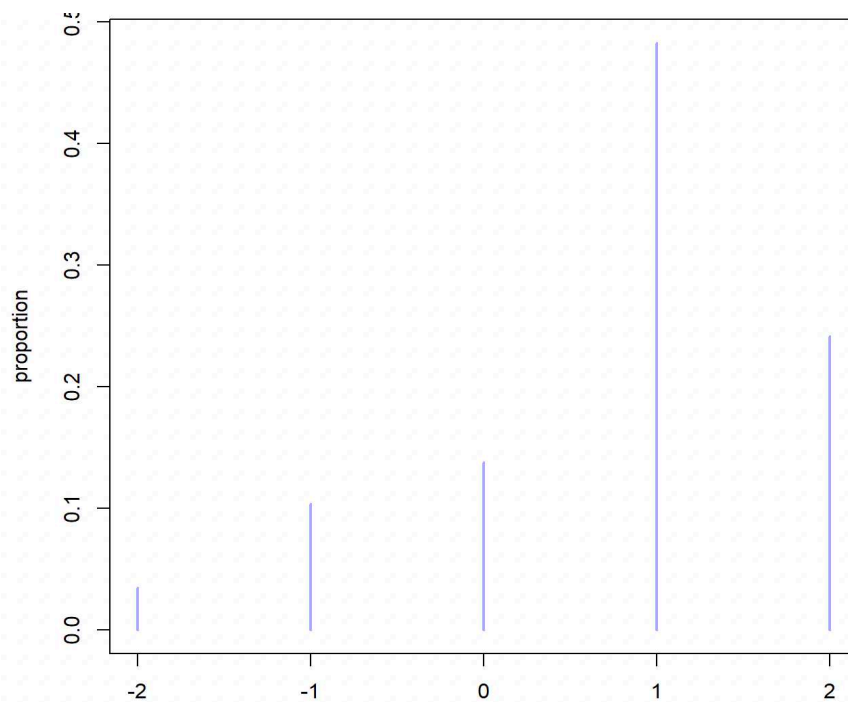


Figure 22 : Distribution of the authors' satisfaction score

3.6 Bivariate analyses

Figure 23 illustrates the relationship between the satisfaction score and the interest link score. We observed a positive and statistically significant correlation ($r=0.38$, $p=0.041$).

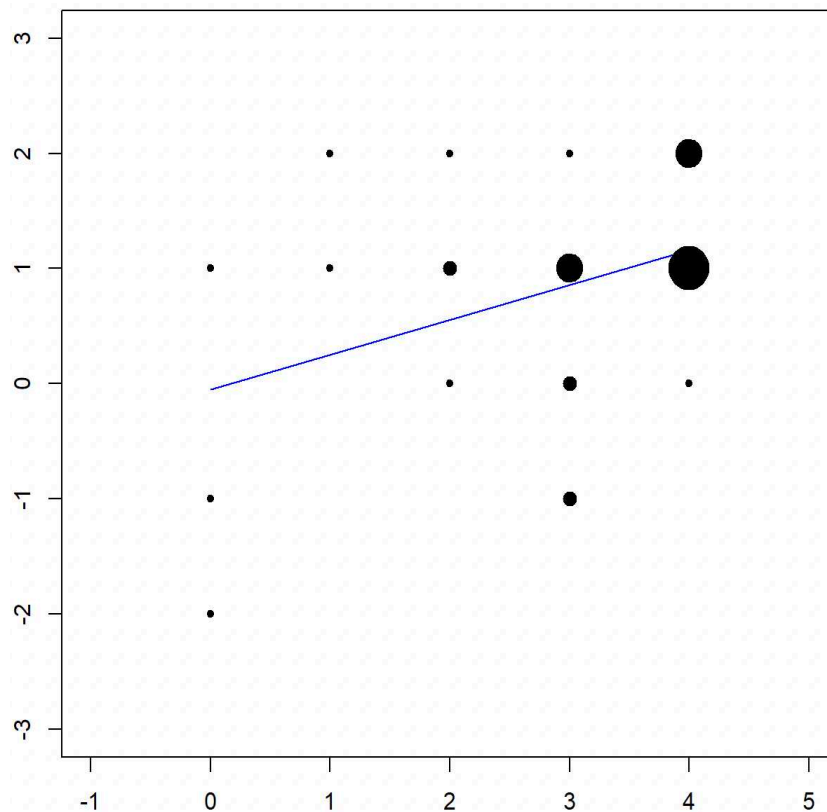


Figure 23 : Satisfaction score (y) as a function of interest link score (x)

We did not observe any significant correlation between the presence of statistical and methodological quality defects and the satisfaction score attributed to the software tested ($p=0.42$).

We did not observe any significant correlation between the interest link score and the presence of quality defects in the study ($p=0.72$).

4 Discussion

4.1 Key results

This statistical research study analyzes the methodology used in articles dealing with automated ECG interpretation. It highlights a good number of studies conducted with a proven link of interest between the author and the designer of the software used. Other studies do not specify a possible conflict of interest.

We also note the existence of a positive correlation between the score of the link of interest and the satisfaction displayed by the authors.

The links of interest mainly relate to occasional private financing, or the presence of authors affiliated or financed by the company producing the automated interpretation module.

4.2 Discussion of the results

The automated interpretation of ECGs (ECG-CI) seems attractive in view of the importance of this diagnostic tool and the difficulties of visual interpretation by caregivers not used to this practice. However, in the literature, the limitations of the use of automated ECG-CI in certain circumstances are already known.

Indeed, ECG-CI lacks reliability or seems random in certain pathologies such as conduction disorders (such as long QT syndrome [75,217]), repolarization disorders, arrhythmias such as the detection of irregular P waves whose shapes are poorly analyzed by the computer [84,85], and pacemaker rhythms [89].

The reliability of the automated interpretation varies according to the presence of associated electrocardiographic disorders [98], pacemakers [84,89,90], or the population studied, such as athletes [103].

Difficulty in interpretation is also related to measurement differences between various standard ECG systems that may be significant enough to alter diagnostic conclusions [218].

The importance of automated interpretation and the concern for its improvement may explain the increasing number of recent publications, but what about the reliability of the results of these studies?

In our study, we attempt to answer this question. This work is believed to be the first to examine the relationship between the presence of quality scores and identifiable factors in published articles regarding the results of ECG-CI.

In this study, a positive correlation was found between the links of interest and the satisfaction score of the author. **This correlation may be the cause of an overestimation of the abilities of the algorithm used to interpret the ECG correctly.**

The recent increase in the number of articles published by different authors leads in this context to a diversity of opinions reported and may explain the variability of the results found. This calls for additional caution in reading and trusting the conclusions of the articles.

4.3 Discussion of the method

To our knowledge, there is no study concerning the methodology of articles on automated ECG interpretation.

In our study, we entrusted the analysis of each article to 3 readers, among whom a senior (EC, PB, AL) was constantly present. The permanent presence of the same reader (MD) may help to reduce the risk of subjective interpretation of the criteria studied.

On the other hand, the lack of information in some articles did not allow the correct identification of certain criteria and may be responsible for an information bias. This lack of information on the links of interest could underestimate the correlation with the quality defect score. It also reduces the power of statistical analysis.

In our study we included 29 articles from PubMed Request, which is still a small number. A larger number of articles at the time of inclusion would provide more power to the results or statistical study. The single-reader study could also be a source of selection bias.

In addition, the quality criteria that we defined are not based on standardized references.

4.4 Clinical significance and perspectives

4.4.1 Clinical significance

The ECG-CI was introduced to improve the correct reading of the ECG, the quality of care and to reduce costs.

The growing number of studies on this interpretation helps to clarify its place in daily medical practice. They also make it possible to develop a diagnostic and therapeutic decision tree that could evolve proportionally to the improvement of this technology.

However, the use of this work must constantly consider the quality of the links of interest that condition their reliability and the impact upon the care provided to patients.

Therefore, studies of many medical publications using more standardized methodological rules could help to evaluate the progress of this technology.

4.4.2 Several perspectives

ECG interpretation considers the population of interest. Thus, it would be interesting to perform studies by adjusting the reference values of the algorithms according to the patient's profile. For example, in athletic patients, it is usual to find an early repolarization: it would then be a question of modifying the baseline reference value according to the patient profile studied [107].

With this perspective and in general, the improvement of algorithms requires collaboration between physicians and algorithm designers. The quality of this collaboration will have an impact on the improvement of standardization and interpretation in daily practice [108,218].

While waiting for this work on the performance of the algorithms, the use of automated interpretation must be cautious, respecting the rules of use based on the knowledge of the current limits of these devices.

It is also interesting to note the value of automated interpretation concluding a normal ECG [78], which saves time in the management of the patient.

The other aspect of the careful use of interpretation is the improvement of training in ECG reading [105], and the use of remote transmission [46]. Effective training would be based on practical repetition of ECG interpretation [55,56]. More recently, the application of eye tracking is beginning to prove itself [107].

Finally, it would be useful for the scientific experts to take an official position on the conditions of use of the CIE in France, to streamline its practice. This is of particular and major interest to general practitioners, who are at the heart of the management of patients in primary care. It would then be necessary to nationalize and standardize recommendations concerning the use of CIE, especially for general practitioners.

5 Conclusion

Many scientific papers reporting results of ECG-CI evaluations still present some quality defects. The presence of interest links appears to positively correlate with optimistic conclusions. Hopefully, it does not correlate with the number of quality defects. This work suggests that good practices about evaluation of artificial intelligence modules and reporting of the results should be published and shared by the scientific community.

Liste des tables

Tableau 1 : Résumé des valeurs normales (d'après [25]).....	26
Tableau 2 : Topographie de l'ischémie myocardique (du CNEC [230])	67

Liste des figures

Figure 1 : Médiastin antérieur (d'après F. Netter, Atlas d'anatomie humaine [2])	9
Figure 2 : Configuration extérieure du cœur (par le Dr SELIT [4])	11
Figure 3 : Anatomie interne (d'après F. Netter, Atlas d'anatomie humaine [2]).....	12
Figure 4 : Activité électrique du cœur (Fondation des maladies du cœur et de l'accident vasculaire cérébral du Canada [8]).....	13
Figure 5 : Les phases du potentiel d'action cardiaque (Dr Mervoyer [11])	14
Figure 6 : Le cœur et la circulation sanguine (de la Fondation des maladies du cœur et de l'AVC du Canada [8]).....	15
Figure 7 : Électromètre capillaire de Lippmann (de Morat [15])	16
Figure 8 : Cardiogramme de Waller enregistré à l'aide d'un électromètre capillaire. e: activité électrique du cœur; h : apex cardiogramme; t: temps (d'après Antoni Bayes de Luna [16])	17
Figure 9 : Le galvanomètre d'Einthoven (d'après George E. Burch [16]).....	18
Figure 10 : Enregistrement d'Einthoven à l'aide d'un électromètre capillaire. En haut : ondes A, B, C et D; en bas: ondes corrigées mathématiquement, désormais désignées par P QRS T (d'après Antoni Bayes de Luna [16]).....	19
Figure 11 : Électrocardiographe autonome actuel (De Médiprostore de Schiller [19])	20
Figure 12 : Localisation des précordiales (d'après le CNEC [11]).....	21
Figure 13 : Les dérivations frontales (du Collège National des Enseignants de Cardiologie et Maladies Vasculaires [22])	23
Figure 14 : Triaxe de Bailey (d'après le CNEC [22])	24
Figure 15 : Papier millimétré utilisé pour l'enregistrement de l'ECG. Échelles de temps et de voltage. (Du Pr Christophe Scavée[23])	25
Figure 16 : Cheminement d'une impulsion électrique correspondant aux pointes et aux ondes sur un ECG (de Trappe [24])	25
Figure 17 : Exemple de Diagramme proposé pour son étude par S. Celin [76]	34
Figure 18 : Flowchart.....	44
Figure 19. Prevalence of statistical and methodological quality defects among articles	45
Figure 20: Distribution of quality defects from articles.....	46
Figure 21 : Distribution of the interest link score	47
Figure 22 : Distribution of the authors' satisfaction score	47
Figure 23 : Satisfaction score (y) as a function of interest link score (x)	48
Figure 24 : Anatomie des artères coronaires (Centre de Cardiologie Interventionnelle de Belledonne [219])	56

Figure 25 : éjection systolique (Dr E. Mervoyer [3])	58
Figure 26 : Remplissage ventriculaire (Dr E. Mervoyer [3]).....	59
Figure 27 : BBD versus BBG (Pr Pierre Taboulet [224])	60
Figure 28 : BAV (Pr Pierre Taboulet [225]).....	62
Figure 29 : Fibrillation atriale avec critères majeurs et mineurs (Pr Pierre Taboulet [227])	63
Figure 30: Tachycardie ventriculaire se transformant en fibrillation ventriculaire (de la FFC du Club Cœur et Santé Saint-Dié [228]).....	65
Figure 31 : Évolution des signes électrocardiographiques au cours d'un SCA ST + [231].....	67

Annexe 1 – Vascularisation cardiaque

1 Le réseau artériel

Il existe deux principales artères coronaires : la gauche et la droite (Figure 24). Elles naissent de l'aorte thoracique ascendante, quelques centimètres au-dessus de l'anneau aortique et cheminent dans le tissu adipeux sous-épicardique.

1.1 Artère coronaire gauche

L'artère coronaire gauche est plus importante que la droite. Son segment initial est le tronc de la coronaire gauche. Il se divise en 2 branches principales [6]:

- L'artère inter-ventriculaire antérieure : elle descend dans le sillon inter-ventriculaire, contourne le bord droit du cœur près de la pointe et se termine dans la partie inférieure du sillon inter-ventriculaire. Elle donne naissance aux diagonales et septales pour vasculariser la paroi antéro-latérale du ventricule gauche, une grande partie du septum inter-ventriculaire, une partie du ventricule droit, et le faisceau de His.
- L'artère circonflexe : elle chemine dans le sillon atrio-ventriculaire gauche jusqu'à la face inférieure du ventricule gauche. Elle donne naissance aux marginales et vascularise la paroi postéro-latérale du ventricule gauche [6].

1.2 Artère coronaire droite

L'artère coronaire droite est plus petite et longe le sillon coronaire droit jusqu'à atteindre le sillon inter-ventriculaire postérieur. Elle donne plusieurs branches collatérales dont l'artère marginale du bord droit et se termine en bifurcation donnant l'artère inter-ventriculaire postérieure et rétro-ventriculaire gauche pour vasculariser le ventricule droit, la paroi inférieure du ventricule gauche, les deux tiers postérieurs du septum inter-ventriculaire et l'essentiel du tissu nodal [6].

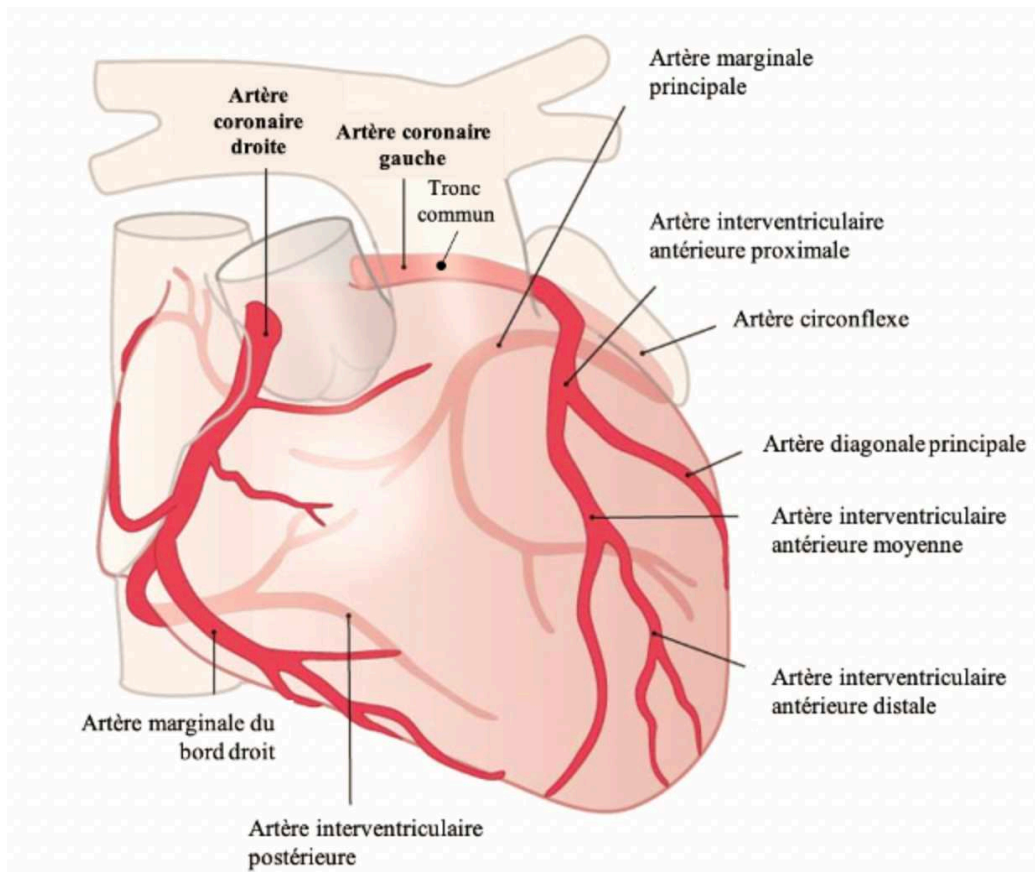


Figure 24 : Anatomie des artères coronaires (Centre de Cardiologie Interventionnelle de Belledonne [219])

2 Veines coronaires

Les veines coronaires sont organisées en deux groupes : les grandes et les petites veines cardiaques. Elles drainent le myocarde du sang désoxygéné [220]. En général, il y a deux fois plus de veines coronaires que d'artères coronaires :

- Les grandes veines cardiaques comprennent le sinus coronaire, les veines atriales, les veines cardiaques antérieures et les veines drainant le septum. Elles représentent 95% de l'ensemble du drainage veineux du cœur.
- Les petites veines cardiaques, également appelées veines thébosiennes, sont des vaisseaux luminaires et se drainent directement dans les chambres cardiaques respectives.

Tout le sang veineux du cœur arrive au sinus coronaire qui est situé dans le sillon atrio-ventriculaire et se déverse directement dans l'atrium droit, à la jonction des sillons coronaire et interventriculaire [6].

3 Innervation cardiaque

Elle est sous la dépendance de 2 systèmes : intrinsèque et extrinsèque.

Le tissu myocardique se contracte de façon rythmique. C'est l'automatisme cardiaque qui est sous la dépendance du système intrinsèque à l'origine de la contraction du cœur (chapitre 1.3) et soutenu par l'extrinsèque [221] :

3.1 Le système parasympathique cardiaque

Il est constitué par les branches du nerf vague cardio-modérateur cholinergique, qui a le rôle de frein vagal. Elles sont réparties de chaque côté en trois groupes : supérieur, moyen et inférieur [222].

3.2 Le système sympathique cardiaque

C'est un système cardio-accélérateur, adrénergique, qui prend son origine à partir des ganglions de la chaîne sympathique cervicale et se répartit en trois groupes : supérieur, moyen et inférieur [222].

3.3 Plexus

Les nerfs de ces deux systèmes convergent vers deux plexus [221] :

- Artériel ou antérieur : il donne naissance au plexus coronaire qui accompagne les artères homologues,
- Veineux ou profond : il donne des filets nerveux à la face postérieure de l'atrium droit et des ventricules.

De ces plexus, naissent les nerfs pour :

- Les nœuds du tissu nodal et sino-atrial, ayant un effet modulateur,
- Et les artères coronaires, avec un effet dilatateur ou constricteur.

Annexe 2 – Physiologie cardiaque

1 La systole ventriculaire

Juste après la fin de la contraction atriale, l'onde de stimulation myocardique franchit le nœud atrio-ventriculaire et se propage rapidement dans la masse ventriculaire. Celle-ci se contracte, ce qui correspond au début de la systole ventriculaire (Figure 25).

La pression intra-ventriculaire commence par augmenter avec la présence de sang intra-ventriculaire, puis ferme les valves atrio-ventriculaires pour empêcher tout reflux. Dès que cette pression dépasse celle de l'artère pulmonaire ou celle de l'aorte, l'ouverture des valves pulmonaire et aortique avec la contraction quasi simultanée des ventricules permet l'expulsion du sang. La fermeture des valves pulmonaire et aortique empêche tout reflux du sang. Pendant ce temps, la relaxation atriale permet le remplissage sanguin des atriums provenant du retour veineux [14].

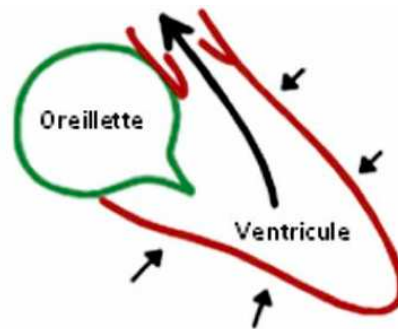


Figure 25 : éjection systolique (Dr E. Mervoyer [3])

2 La diastole ventriculaire

Elle est subdivisée en 2 phases : remplissage rapide et lent. Quand la pression intra-ventriculaire devient inférieure à celle de l'atrium, les valves atrio-ventriculaires s'ouvrent. Accumulé jusque là dans les atriums, le sang passe dans les ventricules dont le volume augmente progressivement jusqu'à la contraction atriale (Figure 26)[21].

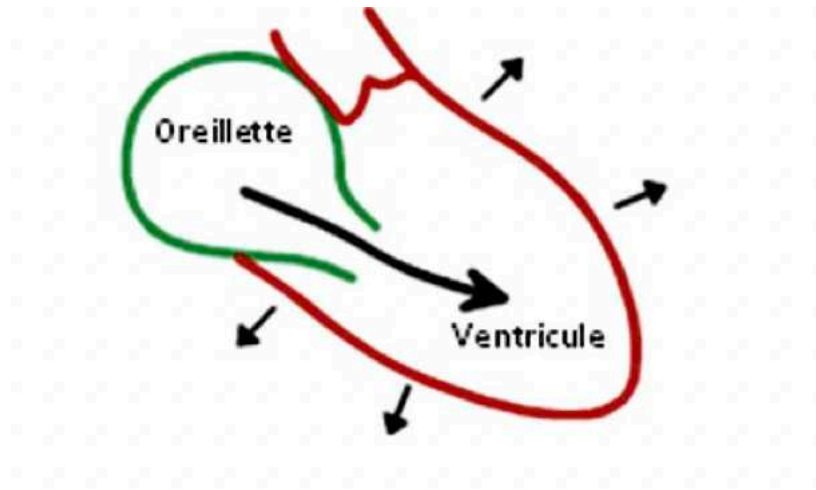


Figure 26 : Remplissage ventriculaire (Dr E. Mervoyer [3])

Annexe 3 – Pathologies cardiaque détectées par l'ECG

1 Troubles de conduction

Les troubles de conduction apparaissent lorsque les impulsions électriques ne sont pas transmises correctement. Les causes les plus fréquentes sont la présence d'une maladie cardiaque et un surdosage de médicaments.

On distingue différentes formes de troubles de conduction en fonction de l'endroit où le trouble se situe [223] :

1.1 Blocs de branche

Les blocs de branche (BB) sont dus à un blocage de la conduction au niveau de la branche droite ou gauche du faisceau de His [223]. Ils se traduisent par un QRS large, donc $>120\text{ms}$, et présente un aspect de dérivations différentes selon la branche bloquée (Figure 27) :

- Un BBD présente un aspect RsR' en V_1 , qR en aVR et qRs en V_6
- Un BBG présente un aspect rS ou QS en V_1 , QS en aVR et R exclusif en V_6 .

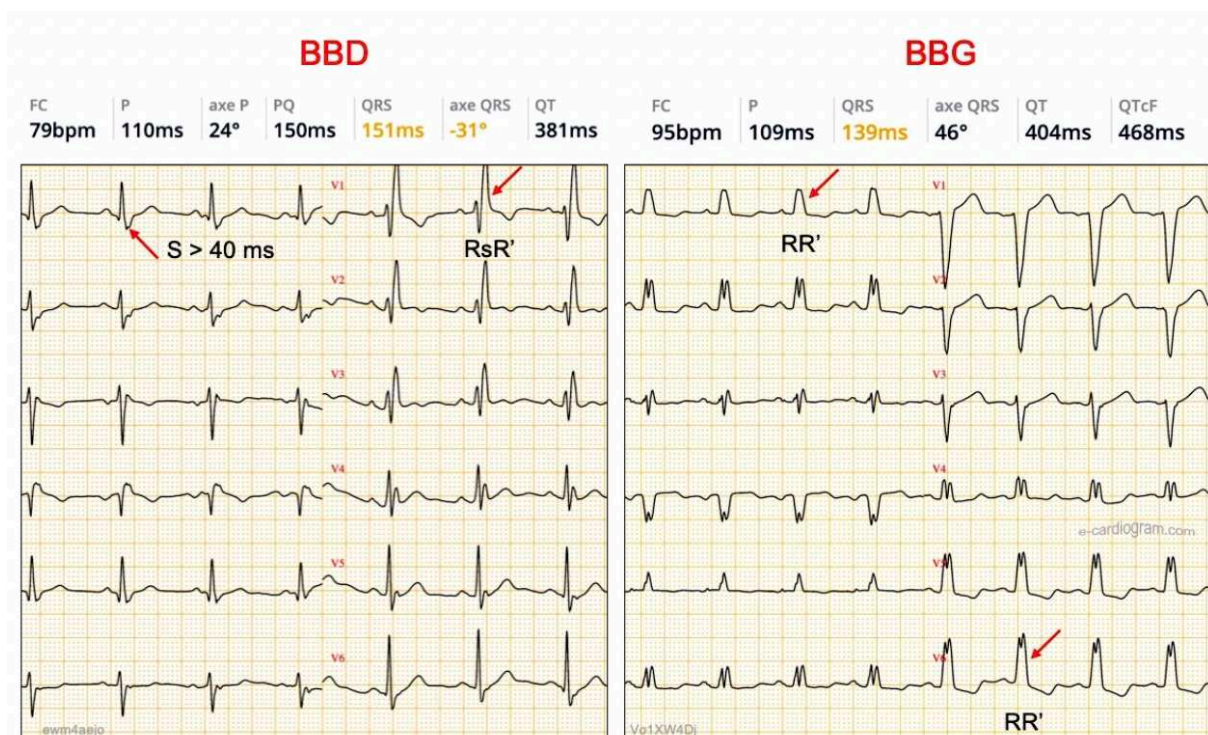


Figure 27 : BBD versus BBG (Pr Pierre Taboulet [224])

1.2 Héli-blocs gauches

Les héli-blocs gauches (HBG) correspondent à un blocage de conduction de la branche gauche du faisceau de His, situé soit au niveau de la branche antérieure, soit celle postérieure.

En pratique, ils se traduisent par une déviation de l'axe QRS :

- S'il est gauche ($QRS < -45^\circ$) : c'est un héli-bloc ou bloc fasciculaire antérieur gauche
- S'il est droit ($QRS > 100^\circ$) : c'est un héli-bloc ou bloc fasciculaire postérieur gauche

Un bloc bi-fasciculaire se compose d'un bloc de branche droit complet et d'un bloc fasciculaire antérieure ou postérieure gauche.

Un bloc tri-fasciculaire est très grave et se traduit par un bloc infra-hissien complet.

1.3 Blocs atrio-ventriculaires

Les blocs atrio-ventriculaires (BAV) sont des défauts de transmission de l'influx électrique entre atriums et ventricules.

Il existe plusieurs degrés (Figure 28) :

- 1^{er} : allongement fixe et constant de PR (> 200 ms),
- 2^e Möbitz 1 : allongement progressif de PR jusqu'à l'observation d'une seule onde P bloquée suivie d'une onde P conduite avec un intervalle PR plus court,
- 2^e Möbitz 2 : intervalle PR fixe et normal mais avec survenue inopinée d'une onde P bloquée,
- BAV de haut degré : plusieurs ondes P bloquées consécutives ou conduction rythmée (2 ondes P bloquées et une conduite),
- 2^e type 2 :1 : deux ondes P pour un QRS,
- 3^e ou bloc complet : aucune onde P n'est conduite, dissociation complète de la conduction atriale et ventriculaire.

Les BAV du 2^e degré Möbitz 2 et BAV de haut degré évoluent souvent vers le BAV complet, et sont témoin de la gravité clinique du patient.

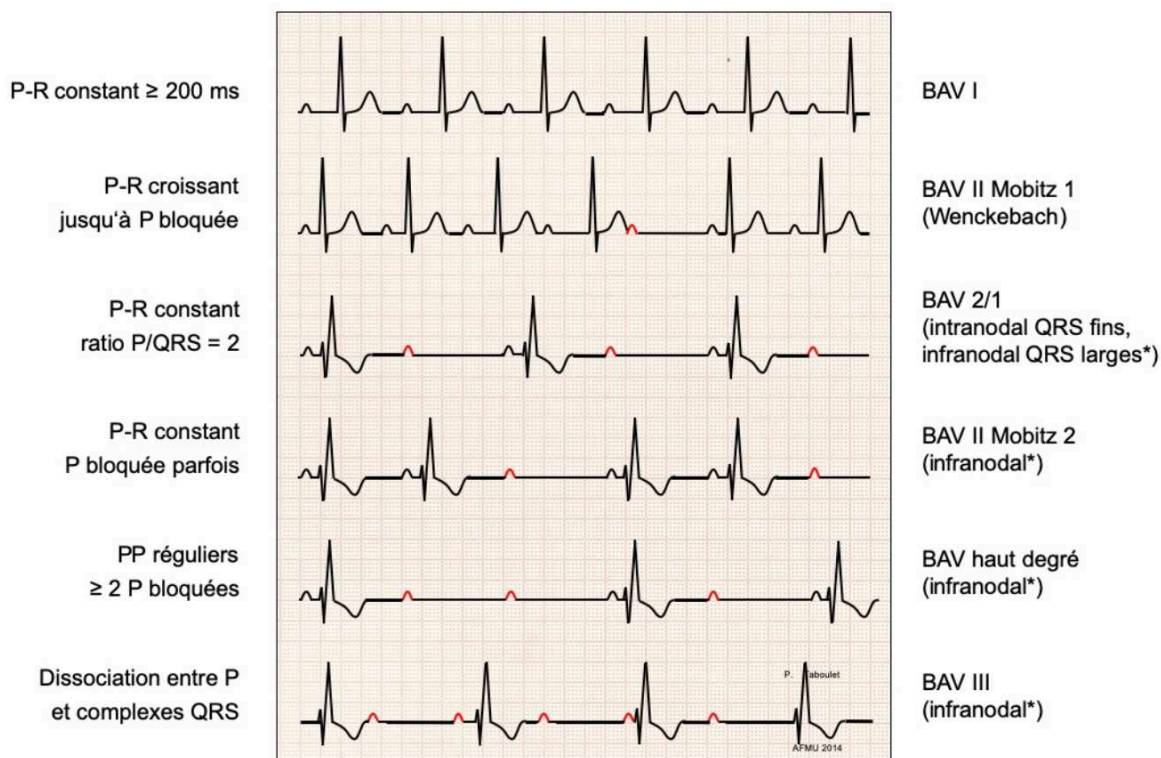


Figure 28 : BAV (Pr Pierre Taboulet [225])

1.4 Dysfonction sinusale

La dysfonction sinusale est une anomalie du nœud sinusal qui provoque une FC lente. Il existe principalement 2 types :

- Pauses : elles se traduisent par une absence du complexe P-QRS-T, avec un tracé plat et sans onde P bloquée. Si la pause d'une onde P à la suivante est égale à un multiple du cycle sinusal normal, c'est un bloc sino-atrial.
- Asystolie : le patient est en arrêt cardiaque et se traduit par un tracé plat.

1.5 Syndrome Wolf Parkinson White

Le syndrome de Wolff-Parkinson-White est une pré-excitation qui traduit la présence d'une fibre ectopique connectant l'atrium au ventricule. Il associe un PR court, un élargissement de QRS, un empâtement du pied de QRS ou la présence d'une onde δ , et à des anomalies de repolarisation.

2 Troubles du rythme supraventriculaires

Les troubles du rythme supraventriculaires sont liés à une anomalie lors de la génération de l'influx nerveux. Ils sont souvent causés par la présence de fibrose dans le muscle cardiaque, le plus souvent secondaire à l'IDM. Les autres causes sont l'HTA, les valvulopathies, l'insuffisance cardiaque, l'hyperthyroïdie, ou la vieillesse [226].

La localisation de l'atteinte détermine l'origine supraventriculaire ou ventriculaire [226].

2.1 Fibrillation atriale

La fibrillation atriale (FA) correspond à des contractions anarchiques et désynchronisées au sein des deux atriums, pendant plus de 30 sec. La conséquence est la perte de leur efficacité hémodynamique.

Elle repose sur les critères majeurs suivants (Figure 29) [227] :

- Absence d'onde P sinusale,
- Variation anarchique de l'activité atriale avec ondulation de la ligne de base plus ou moins ample,
- Intervalles R-R irréguliers.

Les critères mineurs sont les complexes QRS rapides (>100) et fins.

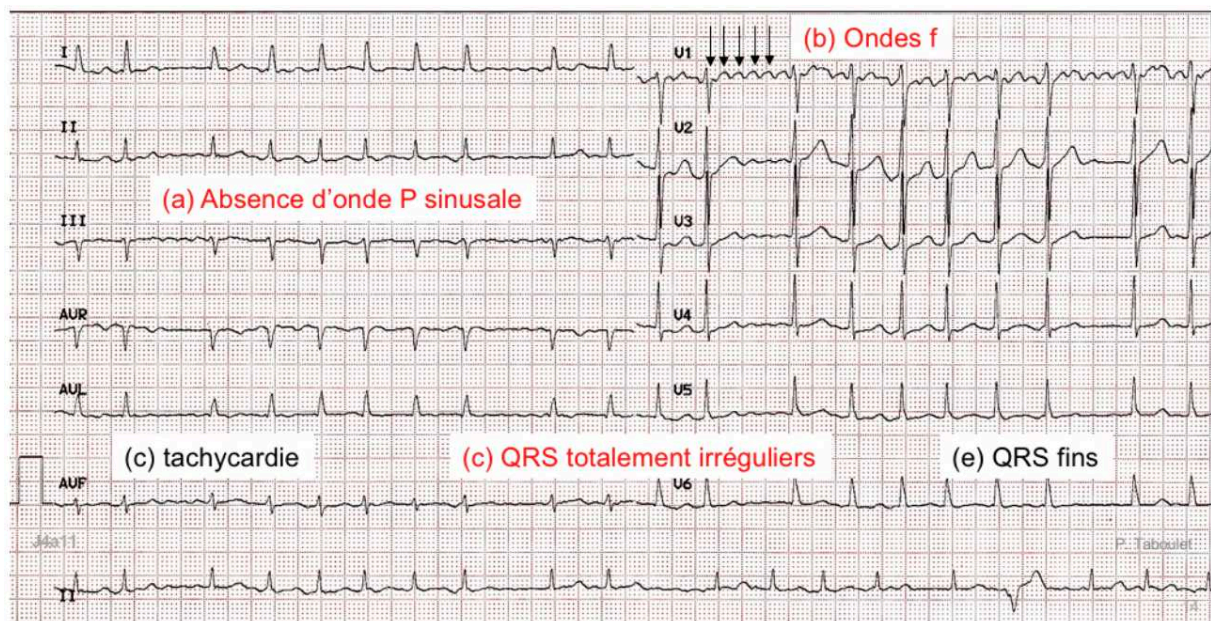


Figure 29 : Fibrillation atriale avec critères majeurs et mineurs (Pr Pierre Taboulet [227])

2.2 Flutter atrial

Le flutter atrial est lié à une boucle d'activation circulaire, le plus souvent dans l'atrium droit.

Il se définit par une tachycardie importante (souvent 300/min) et régulière. L'enchaînement très rapide des ondes P donne un aspect sinusoïdal ou en dents de scie de la ligne de base.

2.3 Tachycardie atriale

La tachycardie atriale est le plus souvent liée à des arythmies atriales focales.

Elle correspond à une tachycardie régulière, entre 120-200 bpm le plus souvent, et retour à la ligne de base entre les ondes P.

2.4 Tachycardie jonctionnelle

La tachycardie jonctionnelle est liée à un court-circuit électrique siégeant à la jonction entre atriums et ventricules.

Elle est définie par une tachycardie très régulière et rapide sans activité atriale (absence d'onde P). Certains la nomme la Maladie de Bouveret.

2.5 Extrasystole atriale

L'extrasystole atriale correspond à des battements prématurés atriaux ou jonctionnels.

Elle se traduit par une onde P prématurée ectopique, souvent de morphologie différente de l'onde P sinusale.

3 Troubles du rythme ventriculaire

Les troubles du rythme ventriculaire prennent naissance à partir de la bifurcation Hissienne.

3.1 Tachycardie ventriculaire

La tachycardie ventriculaire (TV) provient des ventricules. C'est un état électrique instable, prémonitoire de l'arrêt cardiaque.

Sur l'ECG, on observe une tachycardie à QRS large, et dégénère en fibrillation ventriculaire (FV) (Figure 30). Toute tachycardie à QRS larges est une TV jusqu'à preuve du contraire.

3.2 Fibrillation ventriculaire

Dans la FV, les ventricules n'arrivent plus à se contracter et les pulsations sont très rapides et totalement asynchrones.

Sur l'ECG, la tachycardie est irrégulière avec absence d'onde P (Figure 30).

C'est une urgence absolue qui nécessite une cardioversion électrique.

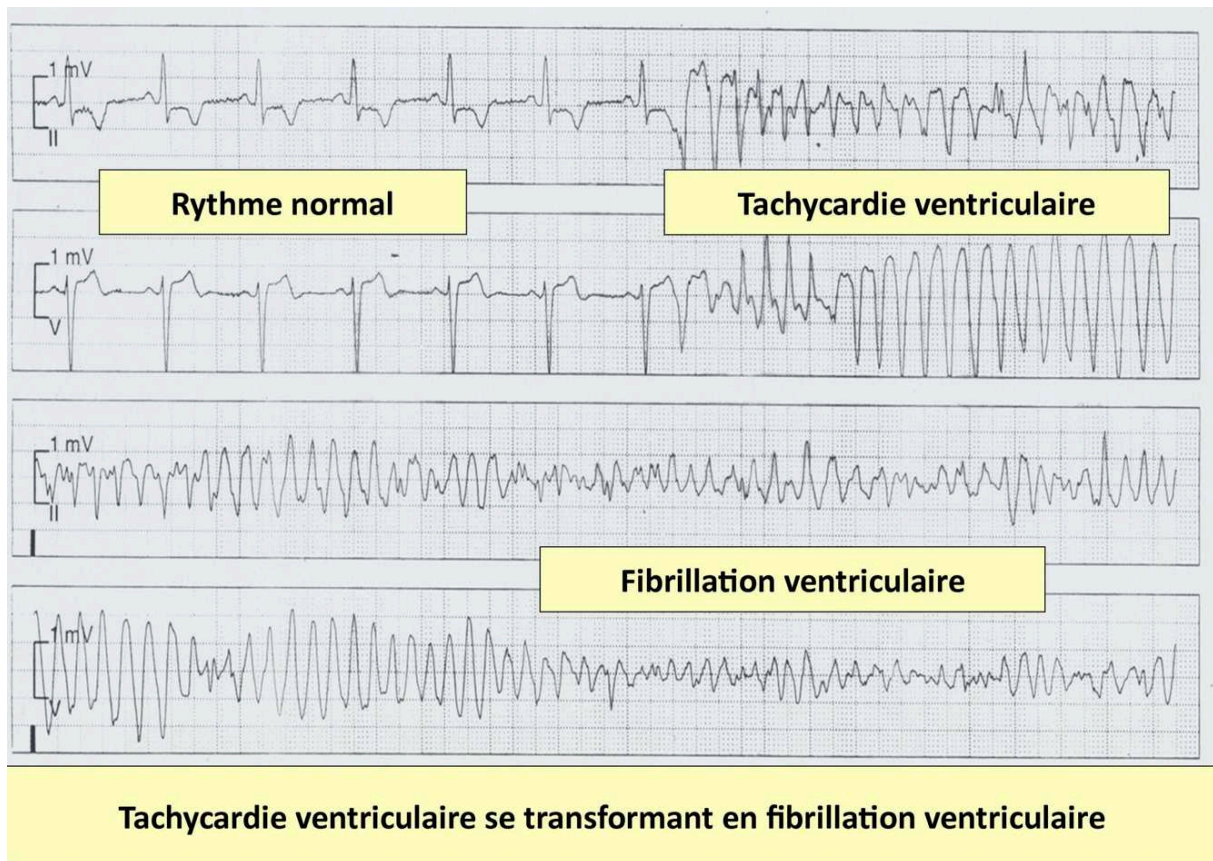


Figure 30: Tachycardie ventriculaire se transformant en fibrillation ventriculaire (de la FFC du Club Cœur et Santé Saint-Dié [228])

3.3 Torsade de pointe

La torsade de pointe est une TV polymorphe. Elle s'observe en cas d'allongement de l'intervalle QT et de bradycardie. Les étiologies sont les suivantes :

- Échappements à QRS larges des BAV bas situés,
- Hypokaliémie ou hypocalcémie,
- Prise de médicaments allongeant l'intervalle QT,
- Syndrome du QT long congénital.

3.4 Extrasystole ventriculaire

L'extrasystole ventriculaire est définie par un battement cardiaque prématuré dû à une activité électrique anormale d'origine ventriculaire.

Elle est représentée par un QRS large, non précédé d'onde P et différent du QRS en rythme sinusal.

4 Maladie coronaire

La maladie coronaire est souvent la conséquence de la formation de plaques athéromateuses dans la paroi artérielle [229].

Ces lésions sont constituées de lipides et de cellules inflammatoires. Elles peuvent faire l'objet de phénomènes de rupture, fissuration, érosion, qui favorisent la formation de thrombi endoluminaux. Un thrombus peut rester non occlusif, se fragmenter et migrer ou être occlusif d'emblée ou secondairement. L'accumulation progressive de dépôts lipidiques ou la cicatrisation imparfaite de lésions rompues sont responsables de la constitution de lésions fibro-athéromateuses.

Les plaques athéromateuses sont souvent asymptomatiques lorsqu'elles restent localisées dans la paroi artérielle.

Lorsqu'il existe des lésions fibro-athéromateuses, à l'origine d'un rétrécissement de la lumière coronaire survenant à l'effort, il s'agit d'un angor stable. Dans ce cas-ci, il n'existe pas de traduction électrocardiographique.

En revanche, les lésions athéro-thrombotiques aiguës sont responsables d'un syndrome coronaire aigu (SCA), qui se traduit cliniquement par des douleurs thoraciques et sur l'ECG par une modification du segment ST selon le type d'occlusion. L'occlusion coronaire aiguë est responsable d'une nécrose myocardique, secondaire à l'absence de perfusion. Une occlusion prolongée d'un tronc épicaordique peut être responsable d'une nécrose étendue et d'une altération de la fonction ventriculaire, pouvant ainsi entraîner des complications graves irréversibles en l'absence d'une prise en charge urgente et adaptée.

L'ECG n'est pas l'examen de référence pour l'IDM mais reste un examen très important pour l'orientation diagnostique, notamment en urgence [229].

4.1 Syndromes coronariens avec sus-décalage ST

Les syndromes coronariens avec sus-décalage ST (SCA ST+) sont les formes les plus graves du SCA. Ils correspondent à une occlusion complète d'une artère coronaire avec un risque de dommage irréversible sur le muscle cardiaque lié à l'absence d'apport en oxygène.

À la phase initiale (12 premières heures), le diagnostic repose avant tout sur l'association de signes cliniques et l'ECG.

Une intervention d'urgence s'impose en cardiologie interventionnelle afin de désobstruer à l'aide de ballonnet et de stent.

4.1.1 Sus-décalage ST

Le sus-décalage du segment ST correspond à la lésion sous-épicaordique habituelle de l'ischémie transmurale aiguë.

On observe une élévation du segment ST sur le territoire lésé. Le segment ST doit être supérieure à 2 mm dans les dérivations précordiales et 1 mm dans les frontales, sur au moins deux dérivations adjacentes.

Dans ce cas, il est indispensable d'effectuer toutes les dérivations (ECG 18 dérivations) : postérieures V7, V8, V9 et droites V3R et V4R, pour dépister la localisation de l'atteinte (Tableau 2) :

Tableau 2 : Topographie de l'ischémie myocardique (du CNEC [230])

Antéro-septale	Antérieure étendue	Latérale haute	Latérale basse	Inférieure	Basale (postérieure)
V1, V2, V3	V1 à V6, DI, VI	DI, VI	V5, V6	DII, DIII, Vf	V7, V8, V9

4.1.2 Onde T négative

L'évolution habituelle après 48h se fait vers une onde T négative, témoin d'une ischémie myocardique (Figure 31).

4.1.3 Onde Q de nécrose

L'onde Q de nécrose est en faveur d'une séquelle d'un infarctus transmural. Sa durée doit dépasser la valeur normale et sa profondeur est supérieure à 25% de l'onde R qui suit.

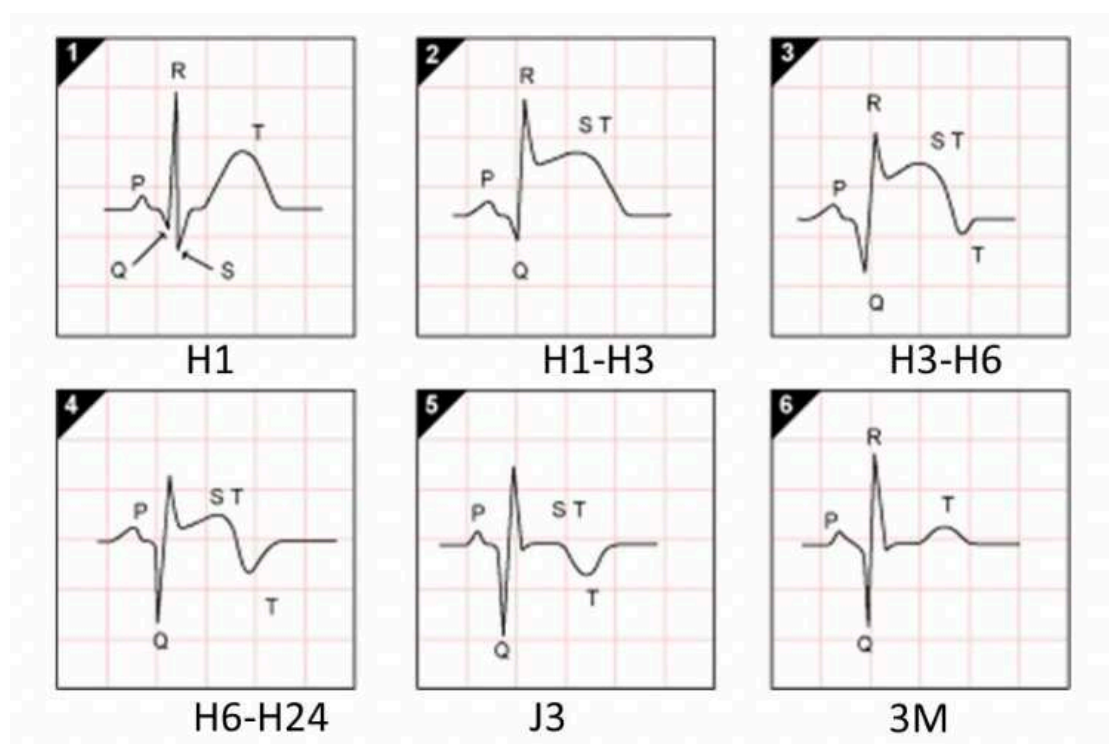


Figure 31 : Évolution des signes électrocardiographiques au cours d'un SCA ST+ [231]

4.1.4 Cas particuliers : BBG et piles cardiaques

La présence de BBG complet au préalable modifie son interprétation et doit amener à suspecter systématiquement ce diagnostic.

Le suivi des patients porteur d'un pacemaker ou d'un défibrillateur sera plus rapproché afin de contrôler leur efficacité. L'interprétation électrocardiographique pour ces patients est modifiée. On se fiera alors aux autres examens complémentaires.

Enfin un ECG normal n'exclut pas un infarctus.

4.2 Syndromes coronaires sans sus-ST

Dans les syndromes coronariens sans sus ST (SCA ST-), l'occlusion de l'artère coronaire est partielle et les séquelles myocardiques restent limitées. Cela regroupe l'angor instable et l'IDM ST-.

Le diagnostic précoce permet une prise en charge adaptée afin de prévenir l'IDM ST+.

La modification la plus caractéristique est le sous-décalage de ST correspondant à une lésion sous-endocardique. Le sous décalage de ST peut être horizontal ou descendant et il est sur deux dérivations contiguës ou plus. On peut retrouver également l'inversion de l'onde T, et des ondes Q pathologiques.

5 Hypertrophie

L'hypertrophie correspond à une dilatation ou à un épaississement du myocarde, secondaire à certaines pathologies cardiaques (HTA, valvulopathie, cardiomyopathie...).

Une hypertrophie atriale droite ou gauche correspond à une anomalie de l'onde P avec respectivement une augmentation de son amplitude ou de la durée.

Une hypertrophie ventriculaire gauche se détecte par l'indice de Sokolow (normale si $SV1 + RV5 < 35$ mm). Il existe d'autres caractéristiques comme l'élargissement du complexe QRS, déviation de l'axe QRS vers la gauche et la négativation de l'onde T dans la forme sévère.

Un axe droit ($> 100^\circ$) est en faveur d'une surcharge ventriculaire droit et un axe gauche ($< -30^\circ$) une surcharge ventriculaire gauche [232].

6 Péricardite

La péricardite correspond à l'inflammation du péricarde, le plus souvent d'origine virale. On peut observer une évolution du tracé électrocardiographique au cours du temps en quatre phases principales :

- 1 qui est brève : microvoltage, sus-décalage de ST concave vers le haut diffus concordant sans image en miroir et sous-décalage de PQ,
- 2 : onde T plate dans toutes les dérivations, ST isoélectrique,
- 3 : onde T négative persistante,
- 4 : retour progressif à la normale.

7 Myocardite

La myocardite est une inflammation du myocarde avec nécrose des myocytes cardiaques. Elle a de multiples étiologies dont les plus fréquentes sont idiopathique, infectieuses, auto-immunes etc.

La biopsie myocardique confirme ce diagnostic.

L'ECG peut-être normal ou anormal. Lorsqu'il est anormal, il est le plus souvent lié à des anomalies du segment ST. Ils peuvent exister également des troubles de conduction ou de rythme [233].

8 Pathologies extracardiaques

D'autres pathologies ont des répercussions sur l'ECG, telles que le surdosage en certains médicaments, des déséquilibres d'électrolytes, l'embolie pulmonaire, etc.

Annexe 4 – Formulaire d’annotation

NUMERO ARTICLE : _____ initiales EVALUATEUR : _____

Cadre de l’article :

- Détection de la FA. Cadre : holter auto-administration classique
- Détection du STEMI chez les SCA
- Détection d’une autre anomalie spécifique précisée
- Aptitude diagnostique de l’appareil sur tout venant (remplacer ou aider un médecin)

Eléments descriptifs :

Design : cohorte (statut inconnu à l’inclusion) cas-témoin

Le cas échéant, préciser le témoin : ECG négatifs des mêmes patients des patients négatifs autres

Le GS est la lecture de l’ECG un autre examen / l’évolution post-ECG / etc.

Utilise une base d’ECG disponible en ligne etc.

Biais à rechercher :

- **Sur le gold standard :**
 - le GS est imprécis dans l’article
 - le GS est de mauvaise qualité (ex : 1 seul cardio, ou pas en aveugle, ou personnel non cardio...)
- **Sur la population étudiée**
 - critères d’inclusion / exclusion non-précisés OU aucune description des anomalies des témoins
 - il existe des facteurs d’exclusion a posteriori (sur les résultats de l’ECG)
 - il existe des exclusions visant à améliorer la performance de l’algorithme (ex : exclure des TDR fréquents) / les témoins sont trop purs
 - proportion inconnue d’exclusions car l’algorithme ne fonctionne pas
 - proportion importante d’exclusions car l’algorithme ne fonctionne pas
 - la proportion d’événements (de cas) est anormale par rapport à l’utilisation pratique visée
 - incohérence entre le workflow étudié et l’utilisation pratique visée OU objectif caché
 - la sélection des cas ou des témoins n’est pas faite par tirage au sort ni par « patients consécutifs »
- **Sur les métriques rapportées**
 - l’article ne fournit pas de tableau de contingence OU un tableau trompeur
 - l’article ne rapporte aucune métrique extrinsèque (VPP, F-mesure, Kappa, RVP ou LR+)
 - l’article ne fournit pas d’intervalle de confiance pour les principales métriques
 - l’article calcule les métriques extrinsèques malgré une prévalence peu crédible (ex : trop élevée)
 - l’article rapporte le pourcentage de concordance observée (agreement)
 - il semble y avoir une erreur dans les métriques rapportées (ex : agreement rapporté k=...)
- **Sur les auteurs et le financement :**
 - 1 (ou plus) auteur est affilié à un organisme public qui développe le produit, ou possède un brevet
 - l’étude a été financée (argent ou matériel) par une société qui développe le produit
 - 1 (ou plus) auteur est affilié à une société privée qui développe le produit, ou possède un brevet
 - 1 (ou plus) auteur a touché de l’argent d’une société privée qui développe le produit
 - 1 (ou plus) auteur est affilié à une société concurrente
 - 1 (ou plus) auteur a touché de l’argent d’une société concurrente
 - aucune mention sur les conflits d’intérêt / le financement, pas même leur absence

Métriques rapportées :

Se Spe VPP VPN Kappa¹ F Mesure rapports de vraisemblance (LR)

Avis des auteurs : inutilisable mauvais ni bon ni mauvais

assez bon (complète humain, permet de prioriser, intéressant mais à vérifier parfois)

bon / utilisable en pratique / peut remplacer humain / permet à une personne moins qualifiée...

¹ kappa entre l’algorithme et le gold standard, à l’exclusion des mesures entre cardiologues du gold standard, par exemple

Annexe 5 – bulletin du CDOM 59

Cet article a été publié en page 11 du Bulletin du Conseil de l'Ordre du Nord des Médecins n°136 (juillet 2022) [234].

DOSSIER

INTERPRÉTATION AUTOMATISÉE DES ECG : PRUDENCE !



Docteur
Emmanuel CHAZARD
Conseiller ordinal
suppléant

Un tiers des MG sont équipés d'interpréteurs automatisés d'ECG

La plupart des électrocardiographes sont dotés d'interpréteurs automatisés. Il s'agit de modules d'intelligence artificielle (IA). La proportion de médecins généralistes (MG) équipés de tels appareils est passée de 29% en 2016 [1] à 37% en 2021 [2]. Ce sont plutôt les MG les plus isolés qui sont équipés de tels dispositifs [1].

Ces modules ne sont pas fiables

L'analyse du signal électrocardiographique (espaces, amplitudes, etc.), fonctionne bien depuis les années 1980. Le diagnostic automatisé (pathologies) n'a jamais vraiment bien fonctionné, au point que 36% des cardiologues refusent catégoriquement de regarder l'interprétation automatisée lorsqu'ils en disposent, ne serait-ce que pour vérifier [1]. Les publications des années 1990 semblaient optimistes. Les publications plus récentes sont de meilleure qualité, et concluent toutes à des résultats modestes, y compris dans les recherches de pointe focalisées sur des problèmes « simples » comme la fibrillation atriale. Aucune publication sérieuse ne conclut que ces appareils peuvent se substituer à une interprétation par un humain. Les publications dont les auteurs n'ont aucun lien d'intérêt avec le fabricant sont les plus sévères quant à l'utilité de ces modules [3].

Ces modules ne sont pas garantis

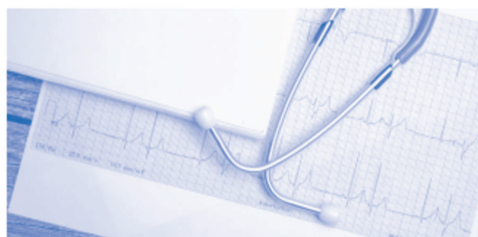
De manière générale, les constructeurs garantissent simplement que leurs appareils ne sont pas nocifs pour le patient, et produisent un signal ECG lisible. L'interpréteur automatisé n'est pas garanti, et son évaluation n'a généralement pas été publiée. Ces modules ne font pas l'objet d'attention particulière des autorités pour plusieurs raisons : ils s'adressent au professionnel de santé et non au patient ; ils ne constituent pas le composant essentiel du dispositif médical ; leur utilisation est optionnelle, et n'entraîne aucune action automatique [4,5].

Seule la responsabilité du médecin est engagée

La facturation d'un acte médical couvre notamment la rémunération de la prestation intellectuelle d'interprétation, et sa transcription [6]. En cas d'erreur médicale liée à l'utilisation d'un tel appareil, seul le médecin reste responsable dans la mesure où, en facturant l'acte, il s'engage à interpréter lui-même le tracé.

Quelles solutions ?

Il existe des solutions moins risquées que de s'appuyer sur les interpréteurs automatisés. Il est possible de se former à la lecture des ECG (FMC, facultés, en ligne, etc.). Il est également possible de réaliser l'acte chaque fois que nécessaire, mais de ne le facturer que lorsqu'on est vraiment certain de l'interprétation. Enfin, il est possible de se faire aider d'un service de télé-interprétation, ou téléexpertise en cardiologie.



Références

- [1] Delrot C, et al. Do Medical Practitioners Trust Automated Interpretation of Electrocardiograms? Stud Health Technol Inform 2019.
- [2] Tabla S, et al. Artificial intelligence and clinical decision support systems or automated interpreters: what characteristics are expected by French general practitioners? Stud Health Technol Inform 2021.
- [3] Djebara M, et al. Evaluation of automated ECG interpreters: biases and conflicts of interest. 2022.
- [4] BPI France. Appel à projets « Evaluation du bénéfice médical et / ou économique des dispositifs médicaux numériques ou à base d'intelligence artificielle » 2021. <https://www.bpifrance.fr/nos-appels-a-projets-concours/appe-a-projets-evaluation-du-benefice-medical-et/ou-economique-des-dispositifs-medicaux-numeriques-ou-a-base-dintelligence-artificielle>
- [5] Haute Autorité de Santé. Evaluer les dispositifs médicaux avec intelligence artificielle 2019. <https://www.techniques-hospitalieres.fr/blog/evaluer-les-dispositifs-medicaux-avec-intelligence-artificielle-n2467>
- [6] L'Assurance Maladie. CCAM en ligne - Facturer en CCAM 2022. <https://www.ameli.fr/accueil-de-la-ccam/regles-de-facturation/facturer-en-ccam/dispositions-generales-et-dispositions-diverses.php>

Emmanuel Chazard est PU-PH au CHU de Lille et à la Faculté de Médecine de l'Université de Lille (biostatistique et informatique médicale). Il dirige le CERIM, fondé en 1984 par le Pr Régis Beuscart pour travailler sur l'intelligence artificielle en santé.

Références

- [1] Le fonctionnement du cœur. Fédération Fr Cardiol 2021. <https://fedecardio.org/je-m-informe/le-fonctionnement-du-coeur/> (accessed October 16, 2021).
- [2] H. Netter F. Atlas d'anatomie humaine (7e édition). Elsevier-Masson. 2019.
- [3] Mervoyer E. Bases de la cardiologie. campus.cerimes.fr 2009. <http://campus.cerimes.fr/media/disquemiroir/2015-06-09/UNF3Smiroir/sahel/application-cardiologie/campus-semiologie-cardio/enseignement/cardiologie/site/html/1.html> (accessed October 16, 2021).
- [4] Selit A. Configuration extérieure du cœur 2019.
- [5] Pinet F. Nouvelles approches pour l'analyse morphologique du cœur sain et pathologique - ClinicalKey Student 2020. <https://www-clinicalkey-com.ressources-electroniques.univ-lille.fr/student/content/emc/51-s2.0-S1166456820594242> (accessed October 16, 2021).
- [6] Chaudhry R, Rahman S, Law MA. Anatomy, Thorax, Heart Arteries. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021.
- [7] Rehman I, Rehman A. Anatomy, Thorax, Heart. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021.
- [8] Comment fonctionne le cœur | Fondation des maladies du cœur et de l'AVC. Fond Mal Cœur L'AVC Can 2021. <https://www.coeuretavc.ca/fr-ca/heart-disease/what-is-heart-disease/how-a-healthy-heart-works/> (accessed October 16, 2021).
- [9] Oberman R, Bhardwaj A. Physiology, Cardiac. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021.
- [10] Shih HT. Anatomy of the action potential in the heart. *Tex Heart Inst J* 1994;21:30–41.
- [11] Mervoyer E. L'électrocardiogramme de repos normal. campus.cerimes.fr 2009. <http://campus.cerimes.fr/semiologie-cardiologique/enseignement/electrocardiogramme/site/html/1.html> (accessed October 16, 2021).
- [12] Wei X, Yohannan S, Richards JR. Physiology, Cardiac Repolarization Dispersion and Reserve. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021.
- [13] Mervoyer E. Les bases de la Cardiologie: Physiologie cardio-vasculaire. campus.cerimes.fr 2009. http://campus.cerimes.fr/semiologie-cardiologique/enseignement/cardiologie/site/html/2_2.html#23 (accessed October 17, 2021).
- [14] Pollock JD, Makaryus AN. Physiology, Cardiac Cycle. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021.
- [15] Morat J-P, Doyon M. Traité de physiologie. [T. 2]. Paris: Masson et Cie; 1902.
- [16] de Luna AB. Willem Einthoven and the ECG. *Eur Heart J* 2019;40:3381–3. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz721>.
- [17] Fye WB. A History of the origin, evolution, and impact of electrocardiography. *Am J Cardiol* 1994;73:937–49. [https://doi.org/10.1016/0002-9149\(94\)90135-X](https://doi.org/10.1016/0002-9149(94)90135-X).
- [18] Pahlm O, Uvelius B. The winner takes it all: Willem Einthoven, Thomas Lewis, and the

- Nobel prize 1924 for the discovery of the electrocardiogram. *J Electrocardiol* 2019;57:122–7. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2019.09.012>.
- [19] ECG : définition et principe de l'électrocardiogramme. *Blog Matér Méd* 2017. <https://blog.mediprostore.com/definition-ecg-electrocardiographie/> (accessed February 6, 2022).
- [20] Noble RJ, Hillis JS, Rothbaum DA. *Electrocardiography*. In: Walker HK, Hall WD, Hurst JW, editors. *Clin. Methods Hist. Phys. Lab. Exam*. 3rd ed., Boston: Butterworths; 1990.
- [21] Sattar Y, Chhabra L. *Electrocardiogram*. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021.
- [22] Almange C, André-Fouët X, Aumont M, Beaufile P, Dérumeaux G, Fauvel J, et al. Chapitre 4 : Examens complémentaires en cardiologie 2010:55.
- [23] Scavée C. *Rappels des principes fondamentaux en électrocardiographie* 2018:11.
- [24] Trappe H-J, Schuster H-P. *EKG-Kurs für Isabel | 9783132200302 | Thieme Webshop*. Kandern: 2013.
- [25] Société Française de Cardiologie. Item 309 : Électrocardiogramme 2010:30.
- [26] Denis B. L'électrocardiogramme pathologique - Corpus Médical de la Faculté de Médecine de Grenoble 2002. <http://www-sante.ujf-grenoble.fr/SANTE/corpus/disciplines/cardio/ecg/hp2/leconhp2.html> (accessed October 24, 2021).
- [27] Letrilliart L, Supper I, Schuers M, Darmon D, Boulet P, Favre M, et al. ECOGEN : étude des Eléments de la COnsultation en médecine GENérale 2014.
- [28] Cardiovascular diseases (CVDs) 2021. [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds)) (accessed October 23, 2021).
- [29] Laura D. Risque cardiovasculaire global en prévention primaire et secondaire : évaluation et prise en charge en médecine de premier recours 2020:15.
- [30] Les propositions de l'Assurance Maladie pour 2021 | L'Assurance Maladie 2020. <https://assurance-maladie.ameli.fr/etudes-et-donnees/2020-rapport-propositions-pour-2021-charges-produits> (accessed December 14, 2021).
- [31] Jaffiol C. [Current management of type 2 diabetes in France]. *Bull Acad Natl Med* 2009;193:1645–61.
- [32] Santé M des S et de la, Santé M des S et de la. *Maladies cardiovasculaires*. Ministère Solidar Santé 2021. <https://solidarites-sante.gouv.fr/soins-et-maladies/maladies/maladies-cardiovasculaires/article/maladies-cardiovasculaires> (accessed December 14, 2021).
- [33] Roth GA, Johnson C, Abajobir A, Abd-Allah F, Abera SF, Abyu G, et al. Global, Regional, and National Burden of Cardiovascular Diseases for 10 Causes, 1990 to 2015. *J Am Coll Cardiol* 2017;70:1–25. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.04.052>.
- [34] Virani SS, Alonso A, Benjamin EJ, Bittencourt MS, Callaway CW, Carson AP, et al. Heart Disease and Stroke Statistics—2020 Update: A Report From the American Heart Association. *Circulation* 2020;141:e139–596. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000757>.
- [35] Rapport Charges et Produits pour 2022 2021. <https://assurance-maladie.ameli.fr/presse/2021-07-02-cp-rapport-charges-et-produits-pour-2022> (accessed December 14, 2021).

- [36] de Peretti C. Accueil | Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques. [Https://drees.solidarites-Santegouvfrsitesdefaultfiles2020-08dd12pdf](https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/sites/default/files/2020-08/dd12pdf) 2017. <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/> (accessed October 23, 2021).
- [37] Weiner RB, Hutter AM, Wang F, Kim JH, Wood MJ, Wang TJ, et al. Performance of the 2010 European Society of Cardiology criteria for ECG interpretation in athletes. *Heart Br Card Soc* 2011;97:1573–7. <https://doi.org/10.1136/hrt.2011.227330>.
- [38] Elbaum M, Evans A, Rotbart G. Les consultations et visites des médecins généralistes - Un essai de typologie. *Etudes Résultats* 2004:12.
- [39] Gouyon M. Les urgences en médecine générale | Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques 2006. <https://drees.solidarites-sante.gouv.fr/publications/documents-de-travail-1998-2019/les-urgences-en-medecine-generale> (accessed February 12, 2022).
- [40] Cretallaz P. Facteurs limitant l'équipement en électrocardiographe en médecine générale: étude nationale épidémiologique incluant 684 médecins généralistes libéraux. Nice, 2016.
- [41] Delrot C, Bouzillé G, Calafiore M, Rochoy M, Legrand B, Ficheur G, et al. Do Medical Practitioners Trust Automated Interpretation of Electrocardiograms? *Stud Health Technol Inform* 2019;264:536–40. <https://doi.org/10.3233/SHTI190280>.
- [42] Macallan DC, Bell JA, Braddick M, Endersby K, Rizzo-Naudi J. The electrocardiogram in general practice: its use and its interpretation. *J R Soc Med* 1990;83:559–62.
- [43] Tabla S. Modules d'intelligence artificielle au cabinet de ville: qu'en attendent les médecins généralistes français ? Thèse d'exercice. Université de Lille, 2021.
- [44] Lombardi Faure L. Utilisation de l'électrocardiographe par les médecins généralistes en milieu rural : dans les départements de l'Aude, de l'Hérault et de la Seine et Marne. 2011.
- [45] Morin S. L'électrocardiogramme en médecine générale: indications actuelles et utilisations. Enquête auprès des médecins généralistes vosgiens. 2018.
- [46] Mele PF. The ECG dilemma: guidelines on improving interpretation. *J Healthc Risk Manag J Am Soc Healthc Risk Manag* 2008;28:27–31. <https://doi.org/10.1002/jhrm.5600280205>.
- [47] Begg G, Willan K, Tyndall K, Pepper C, Tayebjee M. Electrocardiogram interpretation and arrhythmia management: a primary and secondary care survey. *Br J Gen Pract* 2016;66:e291–6. <https://doi.org/10.3399/bjgp16X684781>.
- [48] Breen CJ, Kelly GP, Kernohan WG. ECG interpretation skill acquisition: A review of learning, teaching and assessment. *J Electrocardiol* 2019;S0022-0736(18)30641-1. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2019.03.010>.
- [49] Bond RR, Zhu T, Finlay DD, Drew B, Kligfield PD, Guldenring D, et al. Assessing computerized eye tracking technology for gaining insight into expert interpretation of the 12-lead electrocardiogram: an objective quantitative approach. *J Electrocardiol* 2014;47:895–906. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2014.07.011>.
- [50] Salerno SM, Alguire PC, Waxman HS, American College of Physicians. Training and competency evaluation for interpretation of 12-lead electrocardiograms: recommendations from the American College of Physicians. *Ann Intern Med* 2003;138:747–50. <https://doi.org/10.7326/0003-4819-138-9-200305060-00012>.
- [51] Sibbald M, Davies EG, Dorian P, Yu EHC. Electrocardiographic interpretation skills of

cardiology residents: are they competent? *Can J Cardiol* 2014;30:1721–4. <https://doi.org/10.1016/j.cjca.2014.08.026>.

[52] Cook DA, Oh S-Y, Pusic MV. Accuracy of Physicians' Electrocardiogram Interpretations: A Systematic Review and Meta-analysis. *JAMA Intern Med* 2020;180:1461–71. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2020.3989>.

[53] Rolskov Bojsen S, Räder SBEW, Holst AG, Kayser L, Ringsted C, Hastrup Svendsen J, et al. The acquisition and retention of ECG interpretation skills after a standardized web-based ECG tutorial—a randomised study. *BMC Med Educ* 2015;15:36. <https://doi.org/10.1186/s12909-015-0319-0>.

[54] Hancock EW, Deal BJ, Mirvis DM, Okin P, Kligfield P, Gettes LS, et al. AHA/ACCF/HRS recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram: part V: electrocardiogram changes associated with cardiac chamber hypertrophy: a scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society: endorsed by the International Society for Computerized Electrocardiology. *Circulation* 2009;119:e251–261. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.191097>.

[55] Balady GJ, Bufalino VJ, Gulati M, Kuvin JT, Mendes LA, Schuller JL. COCATS 4 Task Force 3: Training in Electrocardiography, Ambulatory Electrocardiography, and Exercise Testing. *J Am Coll Cardiol* 2015;65:1763–77. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2015.03.021>.

[56] Hammill SC, Andrist EM, Thorkelson LA. Electrocardiogram interpreting technician: training and role in a contemporary electrocardiogram practice. *J Electrocardiol* 2008;41:442–3. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2008.01.005>.

[57] Bond RR, Zhu T, Finlay DD, Drew B, Kligfield PD, Guldenring D, et al. Assessing computerized eye tracking technology for gaining insight into expert interpretation of the 12-lead electrocardiogram: an objective quantitative approach. *J Electrocardiol* 2014;47:895–906. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2014.07.011>.

[58] Mahler SA, Wolcott CJ, Swoboda TK, Wang H, Arnold TC. Techniques for teaching electrocardiogram interpretation: self-directed learning is less effective than a workshop or lecture. *Med Educ* 2011;45:347–53. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2010.03891.x>.

[59] Antiperovitch P, Zareba W, Steinberg JS, Bacharova L, Tereshchenko LG, Farre J, et al. Proposed In-Training Electrocardiogram Interpretation Competencies for Undergraduate and Postgraduate Trainees. *J Hosp Med* 2018;13:185–93. <https://doi.org/10.12788/jhm.2876>.

[60] Baral R, Murphy DC, Mahmood A, Vassiliou VS. The effectiveness of a nationwide interactive ECG teaching workshop for UK medical students. *J Electrocardiol* 2020;58:74–9. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2019.11.047>.

[61] Raupach T, Hanneforth N, Anders S, Pukrop T, Th J ten Cate O, Harendza S. Impact of teaching and assessment format on electrocardiogram interpretation skills. *Med Educ* 2010;44:731–40. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2010.03687.x>.

[62] Riding NR, Drezner JA. Performance of the BMJ learning training modules for ECG interpretation in athletes. *Heart Br Card Soc* 2018;104:2051–7. <https://doi.org/10.1136/heartjnl-2018-313066>.

[63] Liu SS, Zakaria S, Vaidya D, Srivastava MC. Electrocardiogram training for residents: A curriculum based on Facebook and Twitter. *J Electrocardiol* 2017;50:646–51. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2017.04.010>.

- [64] Raupach T, Brown J, Anders S, Hasenfuss G, Harendza S. Summative assessments are more powerful drivers of student learning than resource intensive teaching formats. *BMC Med* 2013;11:61. <https://doi.org/10.1186/1741-7015-11-61>.
- [65] Blissett S, Cavalcanti R, Sibbald M. ECG rhythm analysis with expert and learner-generated schemas in novice learners. *Adv Health Sci Educ Theory Pract* 2015;20:915–33. <https://doi.org/10.1007/s10459-014-9572-y>.
- [66] Sibbald M, Sherbino J, Ilgen JS, Zwaan L, Blissett S, Monteiro S, et al. Debiasing versus knowledge retrieval checklists to reduce diagnostic error in ECG interpretation. *Adv Health Sci Educ Theory Pract* 2019;24:427–40. <https://doi.org/10.1007/s10459-019-09875-8>.
- [67] Breen CJ, Bond R, Finlay D. An evaluation of eye tracking technology in the assessment of 12 lead electrocardiography interpretation. *J Electrocardiol* 2014;47:922–9. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2014.08.008>.
- [68] Helppi RR, Unite V, Wolf HK. Canadian Colloquium on Computer-Assisted Interpretation of Electrocardiograms. IV. Suggested minimal performance requirements and methods of performance evaluation for computer ECG analysis programs. *Can Med Assoc J* 1973;108:1251–9.
- [69] Deo RC. Machine Learning in Medicine. *Circulation* 2015;132:1920–30. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.115.001593>.
- [70] Ramesh AN, Kambhampati C, Monson JRT, Drew PJ. Artificial intelligence in medicine. *Ann R Coll Surg Engl* 2004;86:334–8. <https://doi.org/10.1308/147870804290>.
- [71] Intelligence artificielle et santé | Inserm - La science pour la santé n.d. <https://www.inserm.fr/information-en-sante/dossiers-information/intelligence-artificielle-et-sante> (accessed June 26, 2021).
- [72] Sharpee TO, Destexhe A, Kawato M, Sekulić V, Skinner FK, Wójcik DK, et al. 25th Annual Computational Neuroscience Meeting: CNS-2016. *BMC Neurosci* 2016;17:54. <https://doi.org/10.1186/s12868-016-0283-6>.
- [73] Pipberger HV, Freis ED, Taback L, Mason HL. Preparation of electrocardiographic data for analysis by digital electronic computer. *Circulation* 1960;21:413–8. <https://doi.org/10.1161/01.cir.21.3.413>.
- [74] Kligfield P, Gettes LS, Bailey JJ, Childers R, Deal BJ, Hancock EW, et al. Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram. *J Am Coll Cardiol* 2007;49:1109–27. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2007.01.024>.
- [75] Schläpfer J, Wellens HJ. Computer-Interpreted Electrocardiograms: Benefits and Limitations. *J Am Coll Cardiol* 2017;70:1183–92. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2017.07.723>.
- [76] Celin S, Vasanth K. ECG Signal Classification Using Various Machine Learning Techniques. *J Med Syst* 2018;42:241. <https://doi.org/10.1007/s10916-018-1083-6>.
- [77] Rautaharju PM, Surawicz B, Gettes LS. AHA/ACCF/HRS Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram: Part IV: The ST Segment, T and U Waves, and the QT Interval A Scientific Statement From the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society Endorsed by the International Society for Computerized Electrocardiology. *J Am Coll Cardiol* 2009;53:982–91. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2008.12.014>.
- [78] Hughes KE, Lewis SM, Katz L, Jones J. Safety of Computer Interpretation of Normal

Triage Electrocardiograms. *Acad Emerg Med Off J Soc Acad Emerg Med* 2017;24:120–4. <https://doi.org/10.1111/acem.13067>.

[79] Rautaharju PM. Eyewitness to history: Landmarks in the development of computerized electrocardiography. *J Electrocardiol* 2016;49:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2015.11.002>.

[80] Hongo RH, Goldschlager N. Status of Computerized Electrocardiography. *Cardiol Clin* 2006;24:491–504. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2006.03.005>.

[81] Comparison of automated measurements of electrocardiographic intervals and durations by computer-based algorithms of digital electrocardiographs - ScienceDirect n.d. <https://www.sciencedirect.com/ressources-electroniques.univ-lille.fr/science/article/pii/S0002870313007102> (accessed November 7, 2021).

[82] Willems JL. A plea for common standards in computer aided ECG analysis. *Comput Biomed Res* 1980;13:120–31. [https://doi.org/10.1016/0010-4809\(80\)90011-7](https://doi.org/10.1016/0010-4809(80)90011-7).

[83] Kligfield P, Badilini F, Rowlandson I, Xue J, Clark E, Devine B, et al. Comparison of automated measurements of electrocardiographic intervals and durations by computer-based algorithms of digital electrocardiographs. *Am Heart J* 2014;167:150-159.e1. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2013.10.004>.

[84] Poon K, Okin PM, Kligfield P. Diagnostic performance of a computer-based ECG rhythm algorithm. *J Electrocardiol* 2005;38:235–8. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2005.01.008>.

[85] Alpert JS. Can You Trust a Computer to Read Your Electrocardiogram? *Am J Med* 2012;125:525–6. <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2012.02.001>.

[86] Willems JL, Abreu-Lima C, Arnaud P, van Bommel JH, Brohet C, Degani R, et al. The diagnostic performance of computer programs for the interpretation of electrocardiograms. *N Engl J Med* 1991;325:1767–73. <https://doi.org/10.1056/NEJM199112193252503>.

[87] Guglin ME, Thatai D. Common errors in computer electrocardiogram interpretation. *Int J Cardiol* 2006;106:232–7. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2005.02.007>.

[88] Novotny T, Bond RR, Andrsova I, Koc L, Sisakova M, Finlay DD, et al. Data analysis of diagnostic accuracies in 12-lead electrocardiogram interpretation by junior medical fellows. *J Electrocardiol* 2015;48:988–94. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2015.08.023>.

[89] Guglin ME, Thatai D. Common errors in computer electrocardiogram interpretation. *Int J Cardiol* 2006;106:232–7. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2005.02.007>.

[90] Shah AP, Rubin SA. Errors in the computerized electrocardiogram interpretation of cardiac rhythm. *J Electrocardiol* 2007;40:385–90. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2007.03.008>.

[91] Taggar JS, Coleman T, Lewis S, Heneghan C, Jones M. Accuracy of methods for diagnosing atrial fibrillation using 12-lead ECG: A systematic review and meta-analysis. *Int J Cardiol* 2015;184:175–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2015.02.014>.

[92] Bogun F, Anh D, Kalahasty G, Wissner E, Bou Serhal C, Bazzi R, et al. Misdiagnosis of atrial fibrillation and its clinical consequences. *Am J Med* 2004;117:636–42. <https://doi.org/10.1016/j.amjmed.2004.06.024>.

[93] Bae MH, Lee JH, Yang DH, Park HS, Cho Y, Chae SC, et al. Erroneous Computer Electrocardiogram Interpretation of Atrial Fibrillation and Its Clinical Consequences. *Clin Cardiol* 2012;35:348–53. <https://doi.org/10.1002/clc.22000>.

- [94] Hannun AY, Rajpurkar P, Haghpanahi M, Tison GH, Bourn C, Turakhia MP, et al. Cardiologist-Level Arrhythmia Detection and Classification in Ambulatory Electrocardiograms Using a Deep Neural Network. *Nat Med* 2019;25:65–9. <https://doi.org/10.1038/s41591-018-0268-3>.
- [95] Wagner GS, Macfarlane P, Wellens H, Josephson M, Gorgels A, Mirvis DM, et al. AHA/ACCF/HRS Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram: Part VI: Acute Ischemia/Infarction A Scientific Statement From the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society Endorsed by the International Society for Computerized Electrocardiology. *J Am Coll Cardiol* 2009;53:1003–11. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2008.12.016>.
- [96] O'Connor RE, Al Ali AS, Brady WJ, Ghaemmaghami CA, Menon V, Welsford M, et al. Part 9: Acute Coronary Syndromes: 2015 American Heart Association Guidelines Update for Cardiopulmonary Resuscitation and Emergency Cardiovascular Care. *Circulation* 2015;132:S483-500. <https://doi.org/10.1161/CIR.0000000000000263>.
- [97] Garvey JL, Zegre-Hemsey J, Gregg R, Studnek JR. Electrocardiographic diagnosis of ST segment elevation myocardial infarction: An evaluation of three automated interpretation algorithms. *J Electrocardiol* 2016;49:728–32. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2016.04.010>.
- [98] Bosson N, Sanko S, Stickney RE, Niemann J, French WJ, Jollis JG, et al. Causes of Prehospital Misinterpretations of ST Elevation Myocardial Infarction. *Prehospital Emerg Care Off J Natl Assoc EMS Physicians Natl Assoc State EMS Dir* 2017;21:283–90. <https://doi.org/10.1080/10903127.2016.1247200>.
- [99] Miller MD, Porter CJ, Ackerman MJ. Diagnostic Accuracy of Screening Electrocardiograms in Long QT Syndrome I. *Pediatrics* 2001;108:8–12. <https://doi.org/10.1542/peds.108.1.8>.
- [100] Estes NAM. Computerized interpretation of ECGs: supplement not a substitute. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2013;6:2–4. <https://doi.org/10.1161/CIRCEP.111.000097>.
- [101] Talebi S, Azhir A, Zuber S, Soman S, Visco F, Totouom-Tangho H, et al. Underestimated and unreported prolonged QTc by automated ECG analysis in patients on methadone: can we rely on computer reading? *Acta Cardiol* 2015;70:211–6. <https://doi.org/10.1080/ac.70.2.3073513>.
- [102] Garg A, Lehmann MH. Prolonged QT interval diagnosis suppression by a widely used computerized ECG analysis system. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2013;6:76–83. <https://doi.org/10.1161/CIRCEP.112.976803>.
- [103] Berge HM, Steine K, Andersen TE, Solberg EE, Gjesdal K. Visual or computer-based measurements: important for interpretation of athletes' ECG. *Br J Sports Med* 2014;48:761–7. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093412>.
- [104] Fent G, Gosai J, Purva M. Teaching the interpretation of electrocardiograms: which method is best? *J Electrocardiol* 2015;48:190–3. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2014.12.014>.
- [105] Raupach T, Harendza S, Anders S, Schuelper N, Brown J. How can we improve teaching of ECG interpretation skills? Findings from a prospective randomised trial. *J Electrocardiol* 2016;49:7–12. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2015.10.004>.
- [106] Chazard E, Marcolino MS, Dumesnil C, Caron A, Palhares DMF, Ficheur G, et al. One

Million Electrocardiograms of Primary Care Patients: A Descriptive Analysis. *Stud Health Technol Inform* 2015;216:69–73.

[107] Berge HM, Steine K, Andersen TE, Solberg EE, Gjesdal K. Visual or computer-based measurements: important for interpretation of athletes' ECG. *Br J Sports Med* 2014;48:761–7. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2014-093412>.

[108] Mason JW, Hancock EW, Gettes LS, American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology, American College of Cardiology Foundation, Heart Rhythm Society, et al. Recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram: part II: Electrocardiography diagnostic statement list: a scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society: endorsed by the International Society for Computerized Electrocardiology. *Circulation* 2007;115:1325–32. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.106.180201>.

[109] Delrot C, Bouzillé G, Calafiore M, Rochoy M, Legrand B, Ficheur G, et al. Do Medical Practitioners Trust Automated Interpretation of Electrocardiograms? *Stud Health Technol Inform* 2019;264:536–40. <https://doi.org/10.3233/SHTI190280>.

[110] Sattar Y, Chhabra L. *Electrocardiogram*. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021.

[111] Tabla S. Modules d'intelligence artificielle au cabinet de ville: qu'en attendent les médecins généralistes français ? Thèse d'exercice. Université de Lille, 2021.

[112] Bond RR, Novotny T, Andrsova I, Koc L, Sisakova M, Finlay D, et al. Automation bias in medicine: The influence of automated diagnoses on interpreter accuracy and uncertainty when reading electrocardiograms. *J Electrocardiol* 2018;51:S6–11. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2018.08.007>.

[113] Erdenebayar U, Kim YJ, Park J-U, Joo EY, Lee K-J. Deep learning approaches for automatic detection of sleep apnea events from an electrocardiogram. *Comput Methods Programs Biomed* 2019;180:105001. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.105001>.

[114] Hilmisson H, Lange N, Duntley SP. Sleep apnea detection: accuracy of using automated ECG analysis compared to manually scored polysomnography (apnea hypopnea index). *Sleep Breath Schlaf Atm* 2019;23:125–33. <https://doi.org/10.1007/s11325-018-1672-0>.

[115] Olsen M, Schneider LD, Cheung J, Peppard PE, Jennum PJ, Mignot E, et al. Automatic, electrocardiographic-based detection of autonomic arousals and their association with cortical arousals, leg movements, and respiratory events in sleep. *Sleep* 2018;41. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsy006>.

[116] Zarei A, Asl BM. Automatic Detection of Obstructive Sleep Apnea Using Wavelet Transform and Entropy-Based Features From Single-Lead ECG Signal. *IEEE J Biomed Health Inform* 2019;23:1011–21. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2842919>.

[117] Chazal P de, Jayawardhana M, Sadr N. Optimising the Apnoea Classification Performance of a Neural Network Classifier Processing ECG-Oximetry Signals. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2018;2018:6026–9. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2018.8513626>.

[118] Urtnasan E, Park J-U, Joo E-Y, Lee K-J. Automated Detection of Obstructive Sleep Apnea Events from a Single-Lead Electrocardiogram Using a Convolutional Neural Network. *J Med Syst* 2018;42:104. <https://doi.org/10.1007/s10916-018-0963-0>.

- [119] Acharya UR, Chua EC-P, Faust O, Lim T-C, Lim LFB. Automated detection of sleep apnea from electrocardiogram signals using nonlinear parameters. *Physiol Meas* 2011;32:287–303. <https://doi.org/10.1088/0967-3334/32/3/002>.
- [120] Monahan K, Song Y, Loparo K, Mehra R, Harrell FE, Redline S. Automated detection of atrial fibrillation from the electrocardiogram channel of polysomnograms. *Sleep Breath Schlaf Atm* 2016;20:515–22. <https://doi.org/10.1007/s11325-015-1219-6>.
- [121] Sharma M, Singh S, Kumar A, San Tan R, Acharya UR. Automated detection of shockable and non-shockable arrhythmia using novel wavelet-based ECG features. *Comput Biol Med* 2019;115:103446. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2019.103446>.
- [122] Krasteva V, Jekova I, Dotsinsky I, Didon J-P. Shock advisory system for heart rhythm analysis during cardiopulmonary resuscitation using a single ECG input of automated external defibrillators. *Ann Biomed Eng* 2010;38:1326–36. <https://doi.org/10.1007/s10439-009-9885-9>.
- [123] Jeong J-W, Lee IB, Song Y, Jang Y, Noh HW, Lee S. Sequential algorithm for the detection of the shockable rhythms in electrocardiogram. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2012;2012:5082–5. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6347136>.
- [124] Isasi I, Irusta U, Aramendi E, Ayala U, Alonso E, Kramer-Johansen J, et al. A Multistage Algorithm for ECG Rhythm Analysis During Piston-Driven Mechanical Chest Compressions. *IEEE Trans Biomed Eng* 2019;66:263–72. <https://doi.org/10.1109/TBME.2018.2827304>.
- [125] Badertscher P, Strebel I, Honegger U, Schaerli N, Mueller D, Puelacher C, et al. Automatically computed ECG algorithm for the quantification of myocardial scar and the prediction of mortality. *Clin Res Cardiol Off J Ger Card Soc* 2018;107:824–35. <https://doi.org/10.1007/s00392-018-1253-z>.
- [126] Asatryan B, Ebrahimi R, Strebel I, van Dam PM, Kühne M, Knecht S, et al. Man vs machine: Performance of manual vs automated electrocardiogram analysis for predicting the chamber of origin of idiopathic ventricular arrhythmia. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2020;31:410–6. <https://doi.org/10.1111/jce.14320>.
- [127] Fakhri Y, Melgaard J, Andersson HB, Schoos MM, Birnbaum Y, Graff C, et al. Automatic electrocardiographic algorithm for assessing severity of ischemia in ST-segment elevation myocardial infarction. *Int J Cardiol* 2018;268:18–22. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2018.04.057>.
- [128] Goebel M, Vaida F, Kahn C, Donofrio JJ. A Novel Algorithm for Improving the Diagnostic Accuracy of Prehospital ST-Elevation Myocardial Infarction. *Prehospital Disaster Med* 2019;34:489–96. <https://doi.org/10.1017/S1049023X19004849>.
- [129] Tereshchenko LG, Gatz D, Feeny A, Korley FK. Automated analysis of the 12-lead ECG in the emergency department: association between high-sensitivity cardiac troponin I and the cardiac electrical biomarker. *Crit Pathw Cardiol* 2014;13:25–8. <https://doi.org/10.1097/HPC.0000000000000006>.
- [130] Tripathy RK, Paternina MRA, Arrieta JG, Zamora-Méndez A, Naik GR. Automated detection of congestive heart failure from electrocardiogram signal using Stockwell transform and hybrid classification scheme. *Comput Methods Programs Biomed* 2019;173:53–65. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.03.008>.
- [131] Attia ZI, Kapa S, Yao X, Lopez-Jimenez F, Mohan TL, Pellikka PA, et al. Prospective

- validation of a deep learning electrocardiogram algorithm for the detection of left ventricular systolic dysfunction. *J Cardiovasc Electrophysiol* 2019;30:668–74. <https://doi.org/10.1111/jce.13889>.
- [132] Spadafore MT, Syed Z, Rubinfeld IS. Automated Detection of Benzodiazepine Dosage in ICU Patients through a Computational Analysis of Electrocardiographic Data. *AMIA Annu Symp Proc AMIA Symp* 2015;2015:2083–91.
- [133] Squara F, Chik WW, Benhayon D, Maeda S, Latcu DG, Lacaze-Gadonneix J, et al. Development and validation of a novel algorithm based on the ECG magnet response for rapid identification of any unknown pacemaker. *Heart Rhythm* 2014;11:1367–76. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2014.04.011>.
- [134] Haller PM, Boeddinghaus J, Neumann JT, Sørensen NA, Hartikainen TS, Goßling A, et al. Performance of the ESC 0/1-h and 0/3-h Algorithm for the Rapid Identification of Myocardial Infarction Without ST-Elevation in Patients With Diabetes. *Diabetes Care* 2020;43:460–7. <https://doi.org/10.2337/dc19-1327>.
- [135] Nguyen LL, Su S, Nguyen HT. Neural network approach for non-invasive detection of hyperglycemia using electrocardiographic signals. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2014;2014:4475–8. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2014.6944617>.
- [136] Olofsson P, Norén H, Carlsson A. New FIGO and Swedish intrapartum cardiotocography classification systems incorporated in the fetal ECG ST analysis (STAN) interpretation algorithm: agreements and discrepancies in cardiotocography classification and evaluation of significant ST events. *Acta Obstet Gynecol Scand* 2018;97:219–28. <https://doi.org/10.1111/aogs.13277>.
- [137] Gregg RE, Zhou SH, Dubin AM. Automated detection of ventricular pre-excitation in pediatric 12-lead ECG. *J Electrocardiol* 2016;49:37–41. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2015.08.006>.
- [138] Gavrovska A, Bogdanović V, Reljin I, Reljin B. Automatic heart sound detection in pediatric patients without electrocardiogram reference via pseudo-affine Wigner-Ville distribution and Haar wavelet lifting. *Comput Methods Programs Biomed* 2014;113:515–28. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.11.018>.
- [139] Chen Q, Xu J, Gianni C, Trivedi C, Della Rocca DG, Bassiouny M, et al. Simple electrocardiographic criteria for rapid identification of wide QRS complex tachycardia: The new limb lead algorithm. *Heart Rhythm* 2020;17:431–8. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2019.09.021>.
- [140] Curtin AE, Burns KV, Bank AJ, Netoff TI. QRS Complex Detection and Measurement Algorithms for Multichannel ECGs in Cardiac Resynchronization Therapy Patients. *IEEE J Transl Eng Health Med* 2018;6:1900211. <https://doi.org/10.1109/JTEHM.2018.2844195>.
- [141] Khamis H, Weiss R, Xie Y, Chang C-W, Lovell NH, Redmond SJ. QRS Detection Algorithm for Telehealth Electrocardiogram Recordings. *IEEE Trans Biomed Eng* 2016;63:1377–88. <https://doi.org/10.1109/TBME.2016.2549060>.
- [142] Automatic QRS complex detection algorithm designed for a novel wearable, wireless electrocardiogram recording device - PubMed n.d. <https://pubmed-ncbi-nlm-nih-gov.ressources-electroniques.univ-lille.fr/23366534/> (accessed April 2, 2022).
- [143] Choi C, Kim Y, Shin K. A PD control-based QRS detection algorithm for wearable ECG applications. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int*

Conf 2012;2012:5638–41. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6347273>.

[144] Maheshwari S, Acharyya A, Puddu PE, Schiariti M. Methodology for automated detection of fragmentation in QRS complex of Standard 12-lead ECG. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2013;2013:3789–92. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6610369>.

[145] Saini I, Singh D, Khosla A. QRS detection using K-Nearest Neighbor algorithm (KNN) and evaluation on standard ECG databases. *J Adv Res* 2013;4:331–44. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2012.05.007>.

[146] Wang Y, Deepu CJ, Lian Y. A computationally efficient QRS detection algorithm for wearable ECG sensors. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2011;2011:5641–4. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6091365>.

[147] Lin C-C. Analysis of Abnormal Intra-QRS Potentials in Signal-Averaged Electrocardiograms Using a Radial Basis Function Neural Network. *Sensors* 2016;16:E1580. <https://doi.org/10.3390/s16101580>.

[148] Ravanshad N, Rezaee-Dehsorkh H, Lotfi R, Lian Y. A level-crossing based QRS-detection algorithm for wearable ECG sensors. *IEEE J Biomed Health Inform* 2014;18:183–92. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2013.2274809>.

[149] Bashar SK, Walkey AJ, McManus DD, Chon KH. VERB: VFCDM-Based Electrocardiogram Reconstruction and Beat Detection Algorithm. *IEEE Access Pract Innov Open Solut* 2019;7:13856–66. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2894092>.

[150] Tu Y, Fu X, Li D, Huang C, Tang Y, Ye S, et al. A novel method for automatic identification of motion artifact beats in ECG recordings. *Ann Biomed Eng* 2012;40:1917–28. <https://doi.org/10.1007/s10439-012-0551-2>.

[151] Kim J-H, Seo S-Y, Song C-G, Kim K-S. Assessment of Electrocardiogram Rhythms by GoogLeNet Deep Neural Network Architecture. *J Healthc Eng* 2019;2019:2826901. <https://doi.org/10.1155/2019/2826901>.

[152] Kora P. ECG based Myocardial Infarction detection using Hybrid Firefly Algorithm. *Comput Methods Programs Biomed* 2017;152:141–8. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.09.015>.

[153] Isasi I, Irusta U, Elola A, Aramendi E, Eftestol T, Kramer-Johansen J, et al. A Robust Machine Learning Architecture for a Reliable ECG Rhythm Analysis during CPR. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2019;2019:1903–7. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856784>.

[154] Satija U, Ramkumar B, Manikandan MS. Automated ECG Noise Detection and Classification System for Unsupervised Healthcare Monitoring. *IEEE J Biomed Health Inform* 2018;22:722–32. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2017.2686436>.

[155] Lee J, McManus DD, Merchant S, Chon KH. Automatic motion and noise artifact detection in Holter ECG data using empirical mode decomposition and statistical approaches. *IEEE Trans Biomed Eng* 2012;59:1499–506. <https://doi.org/10.1109/TBME.2011.2175729>.

[156] Garg P, Davenport E, Murugesan G, Wagner B, Whitlow C, Maldjian J, et al. Automatic 1D Convolutional Neural Network-based Detection of Artifacts in MEG acquired without Electrooculography or Electrocardiography. *Int Workshop Pattern Recognit NeuroImaging Int Workshop Pattern Recognit NeuroImaging* 2017;2017. <https://doi.org/10.1109/PRNI.2017.7981506>.

- [157] Granegger M, Werther T, Roehrich M, Losert U, Gilly H. Human ECGs corrupted with real CPR artefacts in an animal model: generating a database to evaluate and refine algorithms for eliminating CPR artefacts. *Resuscitation* 2010;81:730–6. <https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2010.03.003>.
- [158] Qin Q, Li J, Yue Y, Liu C. An Adaptive and Time-Efficient ECG R-Peak Detection Algorithm. *J Healthc Eng* 2017;2017:5980541. <https://doi.org/10.1155/2017/5980541>.
- [159] Jeppesen J, Beniczky S, Fuglsang Frederiksen A, Sidenius P, Johansen P. Modified automatic R-peak detection algorithm for patients with epilepsy using a portable electrocardiogram recorder. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2017;2017:4082–5. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2017.8037753>.
- [160] Karimipour A, Homaeinezhad MR. Real-time electrocardiogram P-QRS-T detection-delineation algorithm based on quality-supported analysis of characteristic templates. *Comput Biol Med* 2014;52:153–65. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2014.07.002>.
- [161] Wang YG, Wu H-T, Daubechies I, Li Y, Estes EH, Soliman EZ. Automated J wave detection from digital 12-lead electrocardiogram. *J Electrocardiol* 2015;48:21–8. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2014.10.006>.
- [162] Jekova I, Krasteva V, Leber R, Schmid R, Twerenbold R, Müller C, et al. Inter-lead correlation analysis for automated detection of cable reversals in 12/16-lead ECG. *Comput Methods Programs Biomed* 2016;134:31–41. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.06.003>.
- [163] Han C, Gregg RE, Feild DQ, Babaeizadeh S. Automatic detection of ECG cable interchange by analyzing both morphology and interlead relations. *J Electrocardiol* 2014;47:781–7. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2014.08.006>.
- [164] Balouchestani M, Raahemifar K, Krishnan S. A high reliability detection algorithm for wireless ECG systems based on compressed sensing theory. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2013;2013:4722–5. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6610602>.
- [165] Kido K, Ono N, Altaf-Ul-Amin MD, Kanaya S, Huang M. The Feasibility of Arrhythmias Detection from A Capacitive ECG Measurement Using Convolutional Neural Network. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2019;2019:3494–7. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856867>.
- [166] Marsili IA, Biasioli L, Masè M, Adami A, Andrighetti AO, Ravelli F, et al. Implementation and validation of real-time algorithms for atrial fibrillation detection on a wearable ECG device. *Comput Biol Med* 2020;116:103540. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.103540>.
- [167] Tobón-Cardona M, Kenttä T, Porthan K, Tikkanen JT, Oikarinen L, Viitasalo M, et al. Waveform prototype-based feature learning for automatic detection of the early repolarization pattern in ECG signals. *Physiol Meas* 2018;39:115010. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aaecef>.
- [168] Ledezma CA, Zhou X, Rodríguez B, Tan PJ, Díaz-Zuccarini V. A modeling and machine learning approach to ECG feature engineering for the detection of ischemia using pseudo-ECG. *PloS One* 2019;14:e0220294. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0220294>.
- [169] Mjihad A, Rosado-Muñoz A, Bataller-Mompeán M, Francés-Villora JV, Guerrero-Martínez JF. Ventricular Fibrillation and Tachycardia detection from surface ECG using time-frequency representation images as input dataset for machine learning. *Comput Methods Programs Biomed* 2017;141:119–27. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.02.010>.

- [170] Xue J, Farrell RM. How can computerized interpretation algorithms adapt to gender/age differences in ECG measurements? *J Electrocardiol* 2014;47:849–55. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2014.08.001>.
- [171] Zusterzeel R, Vicente J, Ochoa-Jimenez R, Zhu J, Couderc J-P, Akinagbe-Zusterzeel E, et al. The 43rd International Society for Computerized Electrocardiology ECG initiative for the automated detection of strict left bundle branch block. *J Electrocardiol* 2018;51:S25–30. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2018.08.001>.
- [172] Ho T-W, Huang C-W, Lin C-M, Lai F, Ding J-J, Ho Y-L, et al. A telesurveillance system with automatic electrocardiogram interpretation based on support vector machine and rule-based processing. *JMIR Med Inform* 2015;3:e21. <https://doi.org/10.2196/medinform.4397>.
- [173] Zhu B, Ding Y, Hao K. A novel automatic detection system for ECG arrhythmias using maximum margin clustering with immune evolutionary algorithm. *Comput Math Methods Med* 2013;2013:453402. <https://doi.org/10.1155/2013/453402>.
- [174] Keshtkar A, Seyedarabi H, Sheikhzadeh P, Rasta SH. Discriminant analysis between myocardial infarction patients and healthy subjects using wavelet transformed signal averaged electrocardiogram and probabilistic neural network. *J Med Signals Sens* 2013;3:225–30.
- [175] Cesari M, Mehlsen J, Mehlsen A-B, Dissing Sorensen HB. Application of a new robust ECG T-wave delineation algorithm for the evaluation of the autonomic innervation of the myocardium. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2016;2016:3801–4. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2016.7591556>.
- [176] Sadr N, Jayawardhana M, Pham TT, Tang R, Balaei AT, de Chazal P. A low-complexity algorithm for detection of atrial fibrillation using an ECG. *Physiol Meas* 2018;39:064003. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/aac76c>.
- [177] Anderson RD, Kumar S, Parameswaran R, Wong G, Voskoboinik A, Sugumar H, et al. Differentiating Right- and Left-Sided Outflow Tract Ventricular Arrhythmias: Classical ECG Signatures and Prediction Algorithms. *Circ Arrhythm Electrophysiol* 2019;12:e007392. <https://doi.org/10.1161/CIRCEP.119.007392>.
- [178] Green CL, Kligfield P, George S, Gussak I, Vajdic B, Sager P, et al. Detection of QT prolongation using a novel electrocardiographic analysis algorithm applying intelligent automation: prospective blinded evaluation using the Cardiac Safety Research Consortium electrocardiographic database. *Am Heart J* 2012;163:365–71. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2011.11.009>.
- [179] Izumi R, Shinohata R, Ohmaru N, Kitawaki T, Usui S, Ikeda S, et al. QT dispersion measured by automatic computerized 12-lead electrocardiography contributes significantly to detection of left ventricular hypertrophy in Japanese patients. *J Int Med Res* 2011;39:51–63. <https://doi.org/10.1177/147323001103900107>.
- [180] Rodríguez-Padial L, Akerström F, Robles-Gamboa C, Andrés J, Ruiz-Baena J. Diagnostic accuracy of left ventricular hypertrophy in patients with myocardial infarction by computer-assisted electrocardiography (ELECTROPRES). *Ann Noninvasive Electrocardiol Off J Int Soc Holter Noninvasive Electrocardiol Inc* 2013;18:170–80. <https://doi.org/10.1111/anec.12009>.
- [181] Rodríguez-Padial L, Rodríguez-Picón B, Jerez-Valero M, Casares-Medrano J, Akerström FO, Calderon A, et al. Diagnostic accuracy of computer-assisted electrocardiography in the diagnosis of left ventricular hypertrophy in left bundle branch block.

- Rev Espanola Cardiol Engl Ed 2012;65:38–46. <https://doi.org/10.1016/j.recesp.2011.07.018>.
- [182] Truong QA, Ptaszek LM, Charipar EM, Taylor C, Fontes JD, Kriegel M, et al. Performance of electrocardiographic criteria for left ventricular hypertrophy as compared with cardiac computed tomography: from the Rule Out Myocardial Infarction Using Computer Assisted Tomography trial. *J Hypertens* 2010;28:1959–67. <https://doi.org/10.1097/HJH.0b013e32833b49cb>.
- [183] Homaeinezhad MR, Sabetian P, Feizollahi A, Ghaffari A, Rahmani R. Parametric modelling of cardiac system multiple measurement signals: an open-source computer framework for performance evaluation of ECG, PCG and ABP event detectors. *J Med Eng Technol* 2012;36:117–34. <https://doi.org/10.3109/03091902.2011.645945>.
- [184] Polk SL, Kashkooli K, Nagaraj SB, Chamadia S, Murphy JM, Sun H, et al. Automatic Detection of General Anesthetic-States using ECG-Derived Autonomic Nervous System Features. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2019;2019:2019–22. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8857704>.
- [185] Suissa L, Lachaud S, Mahagne M-H. Continuous ECG monitoring for tracking down atrial fibrillation after stroke: Holter or automated analysis strategy? *Eur Neurol* 2014;72:7–12. <https://doi.org/10.1159/000358053>.
- [186] Agostinelli A, Marcantoni I, Moretti E, Sbröllini A, Fioretti S, Di Nardo F, et al. Noninvasive Fetal Electrocardiography Part I: Pan-Tompkins' Algorithm Adaptation to Fetal R-peak Identification. *Open Biomed Eng J* 2017;11:17–24. <https://doi.org/10.2174/1874120701711010017>.
- [187] Pelter MM, Xu Y, Fidler R, Xiao R, Mortara DW, Xiao H. Evaluation of ECG algorithms designed to improve detect of transient myocardial ischemia to minimize false alarms in patients with suspected acute coronary syndrome. *J Electrocardiol* 2018;51:288–95. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2017.10.005>.
- [188] Pandey SK, Janghel RR. Automatic detection of arrhythmia from imbalanced ECG database using CNN model with SMOTE. *Australas Phys Eng Sci Med* 2019;42:1129–39. <https://doi.org/10.1007/s13246-019-00815-9>.
- [189] Barrios V, Calderón A, Coca A, González-Juanatey JR, Sarría A, Rodríguez-Padial L. Interpretación computarizada del electrocardiograma para el diagnóstico de hipertrofia del ventrículo izquierdo. Proyecto ELECTROPRES. *Rev Clínica Esp* 2011;211:391–9. <https://doi.org/10.1016/j.rce.2011.03.011>.
- [190] Di Marco A, Anguera I, Rodríguez M, Sionis A, Bayes-Genis A, Rodríguez J, et al. Assessment of Smith Algorithms for the Diagnosis of Acute Myocardial Infarction in the Presence of Left Bundle Branch Block. *Rev Espanola Cardiol Engl Ed* 2017;70:559–66. <https://doi.org/10.1016/j.rec.2016.11.017>.
- [191] Brito R, Mondouagne L-P, Stettler C, Combescure C, Burri H. Automatic atrial fibrillation and flutter detection by a handheld ECG recorder, and utility of sequential finger and precordial recordings. *J Electrocardiol* 2018;51:1135–40. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2018.10.093>.
- [192] Selder JL, Breukel L, Blok S, van Rossum AC, Tulevski II, Allaart CP. A mobile one-lead ECG device incorporated in a symptom-driven remote arrhythmia monitoring program. The first 5,982 Hartwacht ECGs. *Neth Heart J Mon J Neth Soc Cardiol Neth Heart Found* 2019;27:38–45. <https://doi.org/10.1007/s12471-018-1203-4>.
- [193] William AD, Kanbour M, Callahan T, Bhargava M, Varma N, Rickard J, et al. Assessing

the accuracy of an automated atrial fibrillation detection algorithm using smartphone technology: The iREAD Study. *Heart Rhythm* 2018;15:1561–5. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2018.06.037>.

[194] Gröschel S, Lange B, Grond M, Jauss M, Kirchhof P, Rostock T, et al. Automatic Holter electrocardiogram analysis in ischaemic stroke patients to detect paroxysmal atrial fibrillation: ready to replace physicians? *Eur J Neurol* 2020;27:1272–8. <https://doi.org/10.1111/ene.14250>.

[195] Bumgarner JM, Lambert CT, Hussein AA, Cantillon DJ, Baranowski B, Wolski K, et al. Smartwatch Algorithm for Automated Detection of Atrial Fibrillation. *J Am Coll Cardiol* 2018;71:2381–8. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.03.003>.

[196] Smisek R, Viscor I, Jurak P, Halamek J, Plesinger F. Fully automatic detection of strict left bundle branch block. *J Electrocardiol* 2018;51:S31–4. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2018.06.013>.

[197] Wegner FK, Kochhäuser S, Frommeyer G, Lange PS, Ellermann C, Leitz P, et al. Prospective blinded evaluation of smartphone-based ECG for differentiation of supraventricular tachycardia from inappropriate sinus tachycardia. *Clin Res Cardiol Off J Ger Card Soc* 2021;110:905–12. <https://doi.org/10.1007/s00392-021-01856-5>.

[198] Desteghe L, Raymaekers Z, Lutin M, Vijgen J, Dilling-Boer D, Koopman P, et al. Performance of handheld electrocardiogram devices to detect atrial fibrillation in a cardiology and geriatric ward setting. *Eur Eur Pacing Arrhythm Card Electrophysiol J Work Groups Card Pacing Arrhythm Card Cell Electrophysiol Eur Soc Cardiol* 2017;19:29–39. <https://doi.org/10.1093/europace/euw025>.

[199] Attia ZI, Noseworthy PA, Lopez-Jimenez F, Asirvatham SJ, Deshmukh AJ, Gersh BJ, et al. An artificial intelligence-enabled ECG algorithm for the identification of patients with atrial fibrillation during sinus rhythm: a retrospective analysis of outcome prediction. *Lancet Lond Engl* 2019;394:861–7. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)31721-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)31721-0).

[200] Xia X, Ruwald A-C, Ruwald MH, Ugoeke N, Szepietowska B, Kutylifa V, et al. Validation of an automatic diagnosis of strict left bundle branch block criteria using 12-lead electrocardiograms. *Ann Noninvasive Electrocardiol Off J Int Soc Holter Noninvasive Electrocardiol Inc* 2017;22. <https://doi.org/10.1111/anec.12398>.

[201] Smith SW, Rapin J, Li J, Fleureau Y, Fennell W, Walsh BM, et al. A deep neural network for 12-lead electrocardiogram interpretation outperforms a conventional algorithm, and its physician overread, in the diagnosis of atrial fibrillation. *Int J Cardiol Heart Vasc* 2019;25:100423. <https://doi.org/10.1016/j.ijcha.2019.100423>.

[202] Smith SW, Walsh B, Grauer K, Wang K, Rapin J, Li J, et al. A deep neural network learning algorithm outperforms a conventional algorithm for emergency department electrocardiogram interpretation. *J Electrocardiol* 2019;52:88–95. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2018.11.013>.

[203] Sabar MI, Ara F, Henderson A, Ahmed O, Potter C, John I, et al. A study to assess a novel automated electrocardiogram technology in screening for atrial fibrillation. *Pacing Clin Electrophysiol* 2019;42:1383–9. <https://doi.org/10.1111/pace.13800>.

[204] Cai W, Chen Y, Guo J, Han B, Shi Y, Ji L, et al. Accurate detection of atrial fibrillation from 12-lead ECG using deep neural network. *Comput Biol Med* 2020;116:103378. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2019.103378>.

[205] Wenzel BJ, George S, Lakkireddy D, Vanga S, Bommana S, Gussak I, et al. Algorithm for quantitative 3 dimensional analysis of ECG signals improves myocardial diagnosis over

cardiologists in diabetic patients. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc IEEE Eng Med Biol Soc Annu Int Conf* 2011;2011:965–8. <https://doi.org/10.1109/IEMBS.2011.6090218>.

[206] Wilson RE, Kado HS, Percy RF, Butterfield RC, Sabato J, Strom JA, et al. An algorithm for identification of ST-elevation myocardial infarction patients by emergency medicine services. *Am J Emerg Med* 2013;31:1098–102. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2013.04.013>.

[207] Clark EN, Sejersten M, Clemmensen P, Macfarlane PW. Automated Electrocardiogram Interpretation Programs Versus Cardiologists' Triage Decision Making Based on Teletransmitted Data in Patients With Suspected Acute Coronary Syndrome. *Am J Cardiol* 2010;106:1696–702. <https://doi.org/10.1016/j.amjcard.2010.07.047>.

[208] de Champlain F, Boothroyd LJ, Vadeboncoeur A, Huynh T, Nguyen V, Eisenberg MJ, et al. Computerized interpretation of the prehospital electrocardiogram: predictive value for ST segment elevation myocardial infarction and impact on on-scene time. *CJEM* 2014;16:94–105. <https://doi.org/10.2310/8000.2013.131031>.

[209] Winkler S, Axmann C, Schannor B, Kim S, Leuthold T, Scherf M, et al. Diagnostic accuracy of a new detection algorithm for atrial fibrillation in cardiac telemonitoring with portable electrocardiogram devices. *J Electrocardiol* 2011;44:460–4. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2011.01.011>.

[210] Lindow T, Pahlm O, Olson CW, Khoshnood A, Ekelund U, Carlsson M, et al. Diagnostic Accuracy Of The Electrocardiographic Decision Support - Myocardial Ischaemia (EDS-MI) Algorithm In Detection Of Acute Coronary Occlusion. *Eur Heart J Acute Cardiovasc Care* 2020;9:13–25. <https://doi.org/10.1177/2048872618768081>.

[211] Galante O, Amit G, Granot Y, Davrath LR, Abboud S, Zahger D. High-frequency QRS analysis in the evaluation of chest pain in the emergency department. *J Electrocardiol* 2017;50:457–65. <https://doi.org/10.1016/j.jelectrocard.2017.02.009>.

[212] Campbell MJ, Zhou X, Han C, Abrishami H, Webster G, Miyake CY, et al. Pilot study analyzing automated ECG screening of hypertrophic cardiomyopathy. *Heart Rhythm* 2017;14:848–52. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2017.02.011>.

[213] Bhalla MC, Mencl F, Gist MA, Wilber S, Zalewski J. Prehospital electrocardiographic computer identification of ST-segment elevation myocardial infarction. *Prehospital Emerg Care Off J Natl Assoc EMS Physicians Natl Assoc State EMS Dir* 2013;17:211–6. <https://doi.org/10.3109/10903127.2012.722176>.

[214] Svennberg E, Stridh M, Engdahl J, Al-Khalili F, Friberg L, Frykman V, et al. Safe automatic one-lead electrocardiogram analysis in screening for atrial fibrillation. *Eur Eur Pacing Arrhythm Card Electrophysiol J Work Groups Card Pacing Arrhythm Card Cell Electrophysiol Eur Soc Cardiol* 2017;19:1449–53. <https://doi.org/10.1093/europace/euw286>.

[215] Kenttä T, Porthan K, Tikkanen JT, Väänänen H, Oikarinen L, Viitasalo M, et al. Sensitivity and specificity of automated detection of early repolarization in standard 12-lead electrocardiography. *Ann Noninvasive Electrocardiol Off J Int Soc Holter Noninvasive Electrocardiol Inc* 2015;20:355–61. <https://doi.org/10.1111/anec.12226>.

[216] Haeberlin A, Roten L, Schilling M, Scarcia F, Niederhauser T, Vogel R, et al. Software-based detection of atrial fibrillation in long-term ECGs. *Heart Rhythm* 2014;11:933–8. <https://doi.org/10.1016/j.hrthm.2014.03.014>.

[217] Kligfield P, Badilini F, Denjoy I, Babaeizadeh S, Clark E, De Bie J, et al. Comparison of automated interval measurements by widely used algorithms in digital electrocardiographs. *Am Heart J* 2018;200:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ahj.2018.02.014>.

- [218] Willems JL, Arnaud P, van Bommel JH, Bourdillon PJ, Brohet C, Dalla Volta S, et al. Assessment of the performance of electrocardiographic computer programs with the use of a reference data base. *Circulation* 1985;71:523–34. <https://doi.org/10.1161/01.cir.71.3.523>.
- [219] Barbou F, Bertrand M-J, Wittenberg O. Coronarographie - Centre de Cardiologie Interventionnelle Belledonne. Cent Cardiol Interv Belledonne 2020. <https://ccibelledonne.com/le-guide-du-patient/coronarographie-et-catheterisme-cardiaque/> (accessed October 16, 2021).
- [220] Miao JH, Makaryus AN. Anatomy, Thorax, Heart Veins. StatPearls, Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2021.
- [221] Outrequin G, Boutillier B. Innervation cardiaque 2021. <https://www.anatomie-humaine.com/Innervation-cardiaque.html> (accessed December 13, 2021).
- [222] Obadia J-F, Farhat F, Ninet J, Henaine R. Hôpital Cardio-thoracique et Vasculaire - Louis Pradel - à Lyon 2021. <http://www.chircardio-lyon.org/> (accessed December 13, 2021).
- [223] Berne 14 FS de C 3000. Les troubles de la conduction cardiaque - Fondation Suisse de Cardiologie 2021. <https://www.swissheart.ch/fr/maladies-cardiaques-avc/maladies/arythmies-cardiaques/les-troubles-de-la-conduction-cardiaque.html> (accessed October 17, 2021).
- [224] Taboulet P. Bloc de branche 1. Généralité, Pc. E-Cardiogram 2019. <https://www.e-cardiogram.com/bloc-de-branche-1-generalites/> (accessed October 24, 2021).
- [225] Taboulet P. Bloc atrioventriculaire. E-Cardiogram 2019. <https://www.e-cardiogram.com/bloc-auriculo-ventriculaire/> (accessed October 24, 2021).
- [226] Les troubles du rythme cardiaque. Fédération Fr Cardiol 2021. <https://fedecardio.org/jem-informe/les-troubles-du-rythme-cardiaque/> (accessed October 17, 2021).
- [227] Taboulet P. Fibrillation atriale 2. ECG. E-Cardiogram 2019. <https://www.e-cardiogram.com/fibrillation-atriale-2-ecg/> (accessed October 24, 2021).
- [228] Saint-Dié CC et S de. 40 ans de progrès en cardiologie. Chapitre 5 : les arythmies cardiaques – Club Cœur et Santé de Saint-Dié 2021. <https://coeursante.deodat.fr/2020/06/14/40-ans-de-progres-en-cardiologie-chapitre-5-les-arythmies-cardiaques/> (accessed October 24, 2021).
- [229] Isnard R, Lacroix D. 2e édition du référentiel de cardiologie pour la préparation des ECN | Société Française de Cardiologie 2018. <https://www.sfcardio.fr/page/2e-edition-du-referentiel-de-cardiologie-pour-la-preparation-des-ecn> (accessed December 14, 2021).
- [230] Angine de poitrine et infarctus myocardique. *Cardiologie*. Société Française de Cardiologie, 01/02/20012.
- [231] ECG d'évolution (étape par étape) de STEMI (élévation du segment ST infarctus du myocarde) syndrome coronarien aigu, l'angine de poitrine. 123RF 2022. https://fr.123rf.com/photo_55067909_ecg-dévolotion-étape-par-étape-de-stemi-élévation-du-segment-st-infarctus-du-myocarde-syndrome-coron.html (accessed February 6, 2022).
- [232] Surawicz B, Childers R, Deal BJ, Gettes LS, Bailey JJ, Gorgels A, et al. AHA/ACCF/HRS recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram: part III: intraventricular conduction disturbances: a scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society: endorsed by the International Society for Computerized Electrocardiology. *Circulation* 2009;119:e235-240. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.108.191095>.

[233] Hoit B. Myocardite - Troubles cardiovasculaires. Édition Prof Man MSD 2020. <https://www.msmanuals.com/fr/professional/troubles-cardiovasculaires/myocardite-et-p%C3%A9ricardite/myocardite> (accessed February 6, 2022).

[234] Chazard E. Interprétation automatisée des ECG : prudence ! - Bulletin du Conseil départemental du Nord de l'Ordre des médecins n°136, page 11. Cons Dép Nord L'Ordre Médecins 2022. https://www.ordre-medecin-nord.org/administrator/components/com_bulletin/pdf/Bulletin_136.pdf (accessed September 5, 2022).

AUTEUR : Nom : DJEBARA

Prénom : Mona

Date de Soutenance : 01/12/2022

Titre de la Thèse : Les médecins généralistes peuvent-ils se fier aux interpréteurs automatisés d'ECG? Revue critique de la littérature.

Thèse - Médecine - Lille 2022

Cadre de classement : Médecine Générale

DES + spécialité : Médecine Générale

Mots-clés : électrocardiographie ; intelligence artificielle ; méthode d'évaluation

Résumé :

Contexte :

L'électrocardiographie (ECG) est largement utilisée en soins primaires, à des fins de prévention, de diagnostic positif, de diagnostic différentiel, ou de suivi d'une pathologie chronique ou d'un traitement. En France, plus du tiers des médecins généralistes (MG) utilisent un interpréteur automatisé d'ECG (ECG-CI pour *ECG computerized interpreter*), et font donc confiance à des modules d'IA qui ne sont pas suffisamment fiables. Pourtant, plusieurs articles scientifiques clament le contraire, mais semblent entachés de biais.

Matériel et Méthodes : Nous avons sélectionné dans Medline des articles évaluant des ECG-CI, et relevé (double lecture en aveugle, puis consensus) les biais présents dans ces articles.

Résultats : La requête a ramené 104 articles, dont 29 ont été inclus. 15 anomalies ou biais récurrents ont été observés, dont les plus fréquents sont : l'absence de tableau de contingence (12 articles, 41.4%), l'absence d'intervalle de confiance (10 articles, 34.5%), l'utilisation du pourcentage de concordance observée (9 articles, 31.0%), l'absence de mesure de validité extrinsèque (6 articles, 20.7%), l'exclusion *a posteriori* des erreurs d'interprétation (5 articles, 17.2%), un gold standard de piètre qualité (5 papers, 17.2%), un workflow incohérent (4 articles, 13.8%), une exclusion de sujets *a posteriori* (4 articles, 13.8%), ou des critères d'inclusion et d'exclusion non-documentés (3 articles, 10.3%). Des liens d'intérêt ont été retrouvés dans 26 articles (89,7%). Nous avons observé une corrélation positive et significative entre le score de satisfaction et le score de liens d'intérêts ($r=0.38$, $p=0.041$).

Conclusion : Des bonnes pratiques d'évaluation des modules d'intelligence artificielle devraient être partagées par la communauté scientifique.

Composition du Jury :

Président : Monsieur le Professeur Emmanuel CHAZARD

Assesseurs : Monsieur le Docteur Matthieu CALAFIORE
Monsieur le Docteur Youssef LAKHAL

Directeur : Monsieur le Professeur Emmanuel Chazard