

Ce chapitre décrit très sommairement les différentes pathologies cardiaques susceptibles d'être repérées en étudiant un enregistrement Holter. Le but, ici, n'est pas d'analyser précisément leurs origines, et leurs conséquences sur le fonctionnement cardiaque [Houghton, 1997], [Dubin, 1999], ni de décrire les traitements que ces pathologies nécessitent, mais simplement de mettre en relation certaines observations anormales du tracé ECG avec les pathologies les plus courantes. Il s'agit ainsi de sensibiliser le lecteur à l'importance diagnostique de l'étude des caractéristiques des ondes P, Q, R, S et T (formes, distances relatives, ...), au-delà d'une simple analyse de rythme. De plus, ce chapitre permet de présenter de nombreux tracés anormaux qui sont justement ceux que l'algorithme sera amené à analyser.

L'introduction présente les paramètres clefs de l'analyse ECG. Les pathologies repérables par un trouble de la fréquence et de la régularité cardiaque sont ensuite décrites, suivies de celles qui affectent la forme des ondes et les distances entre celles-ci.

I Introduction

On introduit ici les paramètres d'intérêt pour l'étude du rythme et de la forme des ondes de l'ECG. Les valeurs indiquées sont celles normalement enregistrées chez l'adulte.

I.1 Le rythme cardiaque

L'étude du rythme cardiaque se fait à partir du repérage des ondes R ; ce rythme est caractérisé par deux propriétés : la fréquence des ondes R, exprimée en nombre de *battements par minute (bpm)*, et leur régularité.

En l'absence de toute pathologie, le rythme est régulier¹ et sa fréquence est comprise entre 60 et 100 bpm la journée et 40 et 80 bpm la nuit. Hors de ces limites, il peut y avoir *trouble du*

¹ Mais non strictement constant, un écart-type idéal de la distribution de l'intervalle RR est d'environ 100 ms.

rythme qui doit faire l'objet d'une étude approfondie pour définir une éventuelle pathologie sous-jacente (voir la section II- Diagnostic à partir du rythme). Cependant, toute irrégularité n'est pas pathologique : en effet, le système nerveux autonome, exerçant un contrôle permanent, peut fortement accélérer le rythme en réponse à un contexte particulier : une période de stress (Figure 1) ou d'effort, par exemple. Il est donc essentiel de prendre en considération l'activité du patient avant de poser un diagnostic.

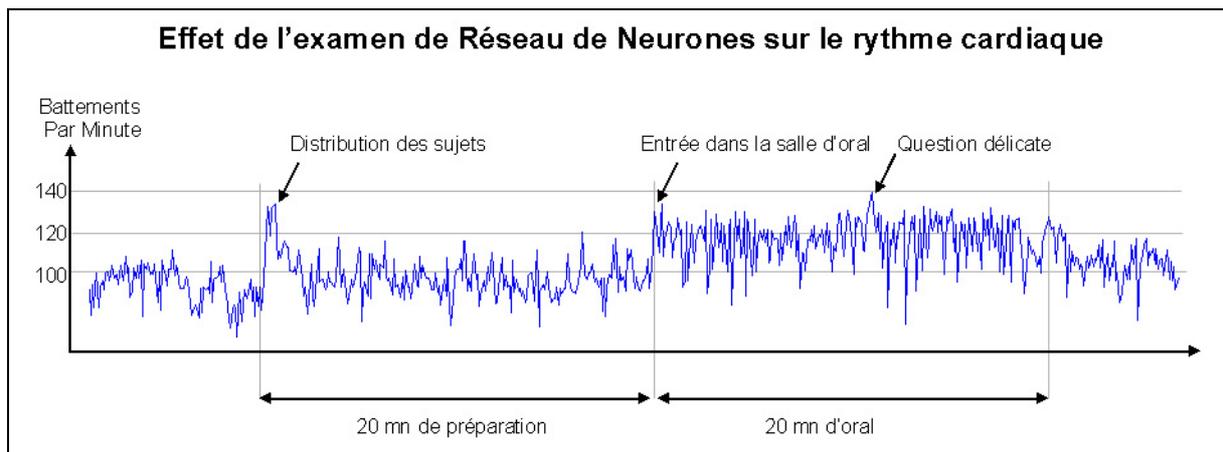


Figure 1 : *Le rythme cardiaque est en permanence soumis au contrôle du système nerveux. Ici, au cours d'une épreuve d'examen oral, le rythme cardiaque d'un étudiant atteint 135 bpm, ce qui reste normal étant donné le contexte.*

1.2 Le battement cardiaque standard et ses caractéristiques

L'étude d'un enregistrement ECG est fondée sur l'analyse de quelques battements cardiaques successifs ; l'étude d'un seul battement ne fournit que peu d'indications pour la pose d'un diagnostic, mais les variations des paramètres caractéristiques de chaque battement au cours de l'enregistrement constituent une source d'information essentielle. Ces paramètres caractéristiques sont :

- Les durées des ondes P, Q, R, S et T, et les amplitudes mesurées par rapport à la ligne de base (Figure 2). La ligne de base, comme nous le verrons dans les chapitres suivants, est la ligne isoélectrique du cœur au repos, qui est prise comme référence

pour mesurer l'amplitude des ondes : pendant l'inactivité cardiaque, le potentiel mesuré est donc normalement nul par rapport à cette référence. C'est le cas au niveau

- de l'intervalle entre les ondes T et P de deux battements successifs,
- de l'intervalle entre les ondes P et Q d'un même battement,
- de l'intervalle entre les ondes S et T (en l'absence de pathologie)

- Les distances entre ces ondes.

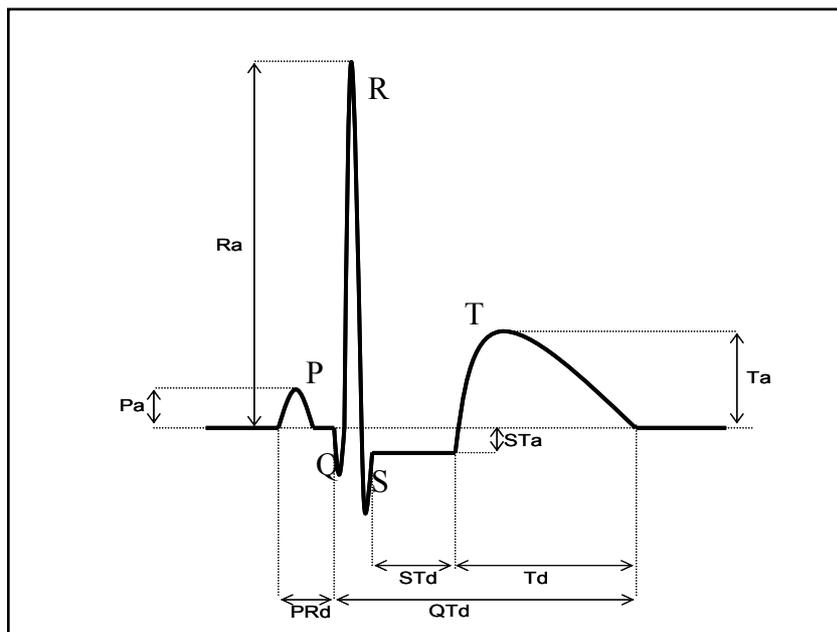


Figure 2: Paramètres d'intérêt pour la description d'un battement.

Les valeurs des paramètres de la Figure 2 couramment constatées chez l'adulte en bonne santé sont présentées dans le tableau 1.

	Onde P	Intervalle PQ	Complexe QRS	Intervalle ST	Intervalle QT	Onde T
Durée (s)	(Pd) 0.08-0.1	(PQd) 0.12-0.2	0.08	(STd) 0.20	(QTd) 0.36 ⁽¹⁾	0.2
Amplitude (mV)	(Pa) 0.25	Isoélectrique : 0	Qa<0, Ra>0, Sa<0	Isoélectrique : 0	-	Ta>0

⁽¹⁾ L'intervalle QT dépend du rythme cardiaque, la valeur donnée ici est pour 70 bpm.

Tableau 1 : valeurs habituelles des différents paramètres caractérisant un battement cardiaque [Slama, 1987].

I.3 Extrasystole ventriculaire (ESV)

L'extrasystole ventriculaire (ESV) est un battement anormal suffisamment répandu pour être présenté en introduction. Les ESV s'observent sur quasiment tous les enregistrements, principalement en période de récupération après un effort. Bien que leur présence n'indique aucune pathologie particulière, si, de façon récurrente, leur nombre par minute est supérieur à 6, elles peuvent être un signe précurseur d'une tachycardie ventriculaire (II.1.2.c Tachycardie ventriculaire), qui, elle, constitue une pathologie majeure.

Contrairement aux battements normaux qui ont pour origine la dépolarisation des cellules sinusales (voir Chap.1-I.2.2. Fonctionnement électrique), l'ESV naît de la dépolarisation spontanée d'un petit groupe de cellules ventriculaires, appelé alors foyer ectopique ventriculaire. L'impulsion électrique créée n'emprunte pas la voie normale de conduction (faisceau de His), et se propage donc plus lentement dans les ventricules. La contraction ventriculaire ainsi étalée dans le temps perd de son efficacité.

Le tracé d'un battement ESV est caractérisé par deux propriétés : l'onde R n'est pas précédée d'une onde P, puisqu'il n'y a pas eu d'activité auriculaire préalable, et la durée du complexe est supérieure à la durée d'un complexe QRS normal (Figure 3).

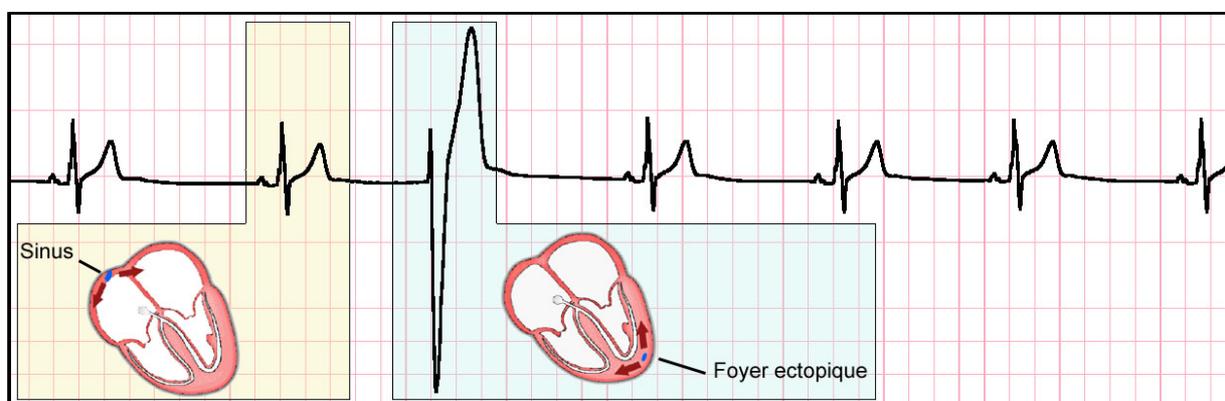


Figure 3: Extrasystole ventriculaire (ESV). Ce type de battement a pour origine la dépolarisation spontanée d'un groupe de cellules des ventricules : il n'est donc pas précédé d'une onde P, et il est plus large qu'un complexe QRS. Les ESV sont pathologiques si leur nombre par minute est supérieur à 6.

II Diagnostic à partir du rythme

Pour dresser un diagnostic à partir d'un enregistrement Holter, deux points essentiels sont à étudier : le rythme cardiaque (fréquence et régularité) et la forme des ondes (distances relatives, amplitudes, durées,...).

L'analyse du rythme ne nécessite que le repérage des ondes R : elle fut donc l'un des premiers traitements automatiques du signal cardiaque. Cette analyse est fondée sur l'extraction, à partir du signal, des deux paramètres caractéristiques suivants : la *fréquence* des battements et leur *régularité*.

Les deux paragraphes qui suivent traitent respectivement des troubles de la fréquence et des troubles de la régularité, sachant que certaines pathologies induisent ces deux anomalies rythmiques.

II.1 Fréquence

Un rythme cardiaque régulier est normal lorsqu'il est compris en journée entre 60 et 100 bpm, et entre 40 et 80 bpm pendant la nuit. Hors de ces limites, on parle de bradycardie lorsqu'il est trop lent, et de tachycardie lorsqu'il est trop rapide.

II.1.1 Bradycardie

La bradycardie est caractérisée par le fait que la fréquence cardiaque est inférieure à 60 bpm ; elle est dite d'origine sinusale, jonctionnelle, ou ventriculaire, selon le site d'initiation de l'impulsion électrique à l'origine des battements considérés.

II.1.1.a Bradycardie sinusale

Outre sa fréquence basse, la bradycardie sinusale est caractérisée par la présence systématique d'une onde P avant les complexes QRS (Figure 4) car l'origine de la contraction ventriculaire reste la dépolarisation du sinus et des oreillettes, comme lors de battements normaux. Les causes d'une telle arythmie sont multiples et souvent extérieures au système cardiovasculaire : traitement médicamenteux (bêtabloquant, digoxine, ...), hypothermie, urémie, ...



Figure 4 : Bradycardie sinusale. Le rythme est de l'ordre de 40 bpm, la présence de l'onde P nous assure de l'origine auriculaire des battements.

II.1.1.b Bradycardie d'origine jonctionnelle

En cas de dysfonctionnement sinusal avec ou sans dépolarisation auriculaire, le nœud AV peut assurer le rôle de pacemaker de secours à une fréquence de l'ordre de 30 à 60 bpm. L'impulsion électrique prend alors naissance dans le nœud auriculo-ventriculaire (AV) et suit le chemin de conduction habituel : la morphologie des ondes QRS est identique à celle du battement normal ; en revanche, l'onde P peut être absente ou, si elle est présente, elle peut être désynchronisée de la systole ventriculaire (Figure 5).

Ce rythme, appelé *rythme d'échappement jonctionnel*, dure jusqu'à ce qu'il soit inhibé par un rythme plus rapide, sinusal par exemple.



Figure 5: Rythme d'échappement jonctionnel lent à 35 bpm. L'impulsion électrique n'est plus transmise des oreillettes aux ventricules : la jonction AV a donc pris le relais, et les ondes d'origine ventriculaire, de forme normale, ne sont pas précédées d'ondes P. On observe cependant une activité auriculaire (onde P) complètement désynchronisée des systoles ventriculaires. Rythme d'échappement ventriculaire

Lorsque le problème de conduction intervient en aval du nœud AV, c'est un groupe de cellules du muscle ventriculaire qui est susceptible de devenir pacemaker (foyer ectopique ventriculaire) ; le rythme devient alors une succession d'ESV à une fréquence très lente, entre 15 et 40 bpm, appelé *rythme d'échappement ventriculaire*. Ce type de pathologie constitue une indication typique de la pose d'un stimulateur cardiaque pour éviter une possible syncope.

II.1.2 La tachycardie

À l'inverse de la bradycardie, la tachycardie est caractérisée par le fait que la fréquence est supérieure à 100 bpm ; elle peut être d'origine sinusale^{II}, auriculaire^{II} ou ventriculaire.

II.1.2.a Tachycardie sinusale

La tachycardie sinusale correspond à un rythme sinusal dont la fréquence est comprise entre 100 et 180 bpm ; on observe, avant chaque complexe QRS, une onde P de forme identique à celle observée lors du rythme normal. On a vu (Figure 1) qu'une « tachycardie » modérée et apparaissant dans des conditions de stress ou d'effort est physiologique. Une tachycardie sinusale est considérée comme pathologique si elle est de longue durée et indépendante du contexte (Figure 6).

Les causes de cette pathologie sont habituellement extra-cardiaques, et incluent tous les facteurs de stimulations du système nerveux : surmenage, anxiété, ... et l'influence de différentes substances comme l'adrénaline ou la caféine.

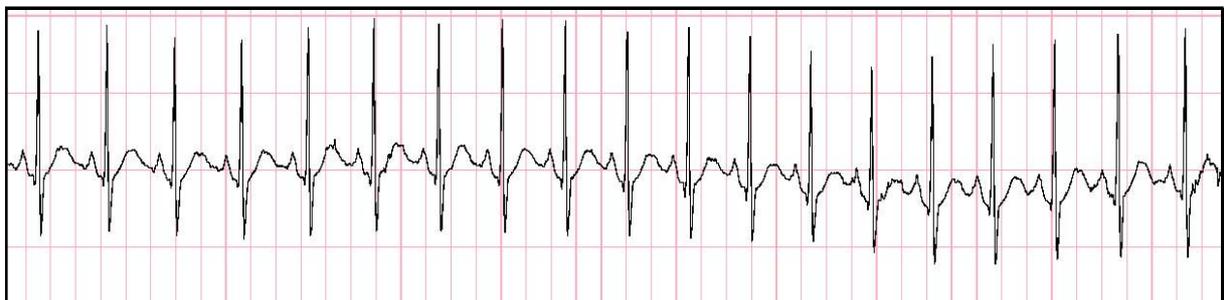


Figure 6 : Tachycardie sinusale. Le rythme est de 120 BPM ; on note la présence systématique d'une onde P avant les complexes QRS. Pour s'assurer du caractère sinusal et ne pas confondre cette tachycardie avec une tachycardie auriculaire due à un foyer ectopique situé dans les

^{II} Le terme tachycardie *supraventriculaire* est aussi utilisé dans la pratique ; il désigne les tachycardies dont l'origine est située au-dessus des ventricules.

oreillettes, il faudrait comparer la forme de l'onde P avec celle observée lors de battements normaux (cf. II.1.2b. Tachycardie auriculaire).

II.1.2.b Tachycardie auriculaire et nodale AV

Très schématiquement, la tachycardie auriculaire peut avoir pour origine un foyer ectopique, une boucle de stimulation (flutter) ou une voie qui court-circuite la voie AV, dite *voie accessoire*, avec réentrée par le nœud AV (ces deux dernières origines sont discutées plus précisément au chapitre des arythmies^{III}, II.2. Les arythmies).

Dans le cas d'un foyer ectopique, il s'agit d'un groupe de cellules situées dans les oreillettes, qui se dépolarisent spontanément et plus rapidement que le sinus, prenant ainsi sa place. La dépolarisation des oreillettes n'étant pas d'origine sinusale, la propagation de l'influx nerveux diffère de celle qui a pour origine le sinus, et l'on observe une onde P de forme inhabituelle. La fréquence typique de décharge de ce type de foyer est comprise entre 120 et 200 ; en l'absence de problèmes de conduction AV, les ventricules sont entraînés au même rythme.

La décharge régulière d'un foyer ectopique localisé dans le nœud AV peut aussi être la cause d'une tachycardie, appelée tachycardie nodale AV ; dans ce cas, la fréquence des battements peut atteindre 250 bpm. Contrairement à la tachycardie auriculaire, aucune onde P ne précède les complexes QRS, car il n'y a pas d'activité auriculaire avant le battement (il peut y avoir une activité auriculaire rétrograde dont la trace sur l'ECG est noyée dans le complexes QRS). Le principal risque de ce type de pathologie est le manque d'efficacité des ventricules qui, contraints de se contracter très fréquemment, n'ont pas le temps de se remplir correctement de sang : l'alimentation du corps en oxygène peut en être altérée.

II.1.2.c Tachycardie ventriculaire (TV)

La tachycardie ventriculaire a pour origine un ou plusieurs foyer(s) ectopique(s) ventriculaire(s) (qui se dépolarisent à tour de rôle). Les battements ont donc la forme d'extrasystoles ventriculaires très rapprochées (Figure 7). Ce type de rythme est dangereux à cause de sa possible évolution en *fibrillation ventriculaire* qui, elle, conduit au décès du

^{III} Elles appartiennent au groupe des *tachyarythmies*.

patient si elle n'est pas traitée à l'aide d'un défibrillateur dans les quelques minutes qui suivent son apparition.



Figure 7 : Tachycardie ventriculaire (TV). On observe sur l'enregistrement une succession d'extrasystoles ventriculaires à une fréquence de 150 bpm ; après la phase de TV, le cœur reprend ici spontanément un rythme sinusal normal.

Les bradycardies et tachycardies présentées précédemment engendrent essentiellement un rythme régulier pendant leur manifestation. Cependant, certains de ces événements peuvent, d'une part, se manifester de manière sporadique, par phases, et produire ainsi des rythmes différents d'assez longues durées, ou, d'autre part, créer de véritables troubles de la régularité ; il s'agit alors de troubles du rythme ou *arythmies*.

II.2 Arythmies, ou troubles de la régularité

L'absence de régularité des battements cardiaques est une caractéristique du rythme importante pour le diagnostic ; elle est souvent associée à un trouble de la production ou de la conduction de l'impulsion électrique (foyers ectopiques, blocs, boucles, ...). Les arythmies permanentes ou sporadiques nécessitent un suivi médical et sont des indications typiques à la pose régulière d'un enregistreur Holter.

II.2.1 Foyer ectopique auriculaire ou nodal AV

Les irrégularités de rythme peuvent traduire la présence d'un ou plusieurs foyers ectopiques auriculaires (Figure 8). La fréquence d'expression de ces foyers, leur alternance entre eux et avec le sinus, et la transmission aux ventricules, peuvent entraîner diverses conséquences rythmiques : de l'extrasystole auriculaire isolée (ESSV) avec un repos compensatoire, qui introduit une distorsion rythmique locale, jusqu'à la fibrillation auriculaire évoquée plus loin, en passant par une tachycardie régulière (cf. II.1.2.b Tachycardie auriculaire et nodale AV) ou une tachyarythmie comme un bigéminisme (1 battements sur 2 est une ESSV)^{IV}.

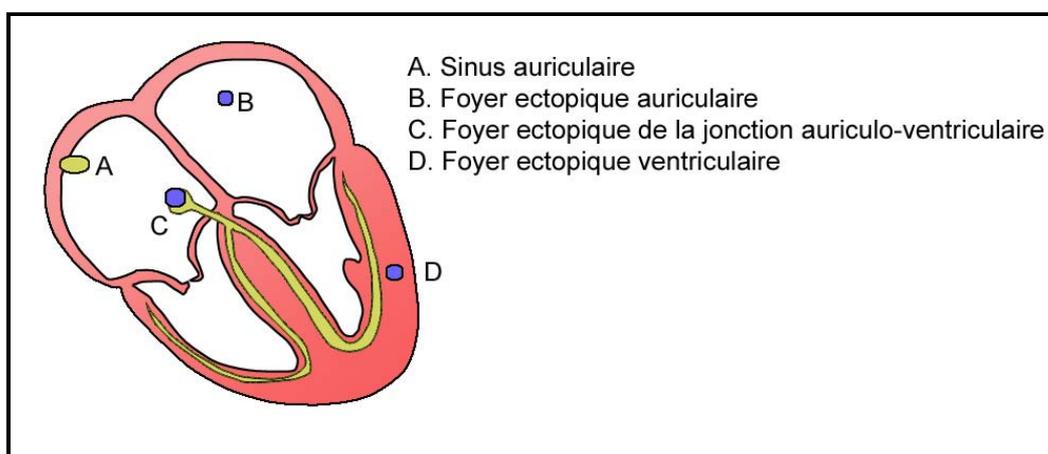


Figure 8 : Emplacement des foyers ectopiques. Lorsqu'il y a un trouble de la production ou de la propagation de l'impulsion cardiaque, un certain nombre de pacemakers de réserve sont susceptibles d'engendrer des battements cardiaques, ce sont des foyers ectopiques, classés suivants leur localisation. Le rythme peut alors apparaître « régulier » si leur activité est continue (rythme d'échappement), « régulièrement irrégulier » (lorsque ces foyers n'enclenchent pas tous les battements mais se manifestent fréquemment et régulièrement, comme dans le cas des bigéminismes, par exemple) ou « irrégulier » (lorsque ces foyers prennent la commande de manière aléatoire ou lorsque leur transmission aux ventricules est aléatoire, dans le cas de foyers ou de boucles supraventriculaires).

II.2.2 Foyer ectopique ventriculaire

Lorsque le foyer ectopique se trouve dans les ventricules, on obtient un battement ESV (cf. I.3. Extrasystole ventriculaire). Les ESV étant fréquemment suivies d'un repos compensatoire, sorte de temps de récupération, elles introduisent en général une distorsion

^{IV} De la même manière, on peut rencontrer un trigéminisme : alternance de 1 battement normal et 2 ESSV. Ces termes (bigéminisme et trigéminisme) s'appliquent également aux alternances entre battement sinusal et ESV (Figure 9).

locale du rythme, qui peut réapparaître plus ou moins fréquemment ou régulièrement selon la fréquence d'expression du ou des foyers ectopiques, et leur caractère aléatoire ou non (Figure 9).

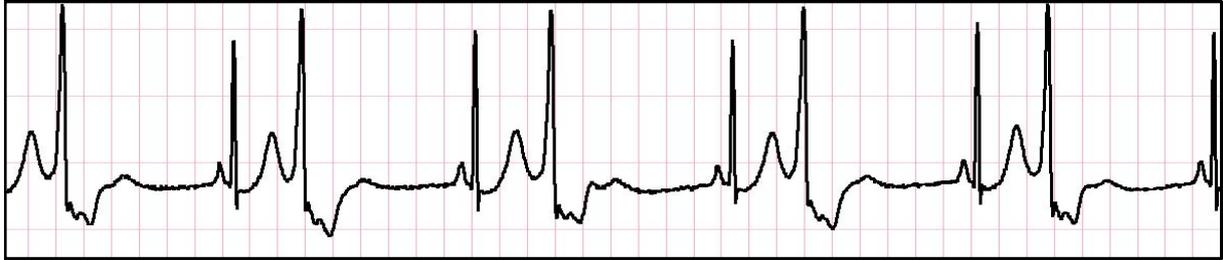


Figure 9 : Bigéminisme ventriculaire. Ici, un foyer ectopique ventriculaire se manifeste de manière régulière, induisant une ESV une fois sur deux.

II.2.3 Le flutter et les fibrillations

- Le *flutter auriculaire* est une autre cause de troubles du rythme ; dans ce cas, la fréquence de l'onde P peut atteindre 300 bpm, voire davantage. À cette fréquence, le nœud auriculo-ventriculaire ne parvient pas à conduire toutes les impulsions électriques vers les ventricules, et l'on observe généralement des *blocs 2:1*, au cours desquels seule une contraction auriculaire sur deux est suivie d'une systole ventriculaire ; la fréquence ventriculaire est donc d'environ 150 bpm dans un tel cas. On observe également, mais plus rarement, des flutters 3:1, 4:1 ou de degrés variables. Notons que, dans ce type de pathologie, il existe un risque majeur pour la santé du patient, en raison de la possibilité de génération d'embolies, dus aux turbulences dans le flux sanguin au niveau des oreillettes.
- La *fibrillation auriculaire* (FA) (Figure 10) est plus fréquente que le flutter ; elle touche 5 à 10% des personnes de plus de 65 ans. Dans cette pathologie, l'activité auriculaire n'est plus composée de battements ; soumis à plusieurs foyers ectopiques et à des boucles de conduction locales, le fonctionnement du myocarde auriculaire est totalement désorganisé. Ces mouvements anarchiques peuvent néanmoins transmettre quelques impulsions au nœud auriculo-ventriculaire, qui les transmet à son tour aux ventricules et entraîne leurs contractions. Comme cette transmission revêt un caractère aléatoire, le rythme des complexes QRS est complètement irrégulier. L'absence des systoles auriculaires n'est pas grave en soi, mais elle est cependant responsable d'une

baisse significative de l'efficacité cardiaque à deux niveaux : d'une part, parce que le cœur ne bénéficie pas de la systole auriculaire qui assure une partie du remplissage sanguin des ventricules, et, d'autre part, parce que le rythme moyen est généralement supérieur à 100 bpm et peut atteindre 200 bpm. Le risque majeur lié à cette pathologie est celui du flutter, c'est-à-dire de l'envoi possible, dans la circulation, d'embolies formés au niveau des oreillettes (particulièrement préjudiciables s'il s'agit de l'oreillette gauche, puisque le ventricule gauche envoie le sang dans la circulation générale, et en priorité vers le cœur et le cerveau). Ce risque est relativement faible lorsqu'une FA est permanente, tandis qu'il est augmenté lors d'épisodes de FA sur fond sinusal (FA paroxystique), surtout lors du passage d'un rythme à l'autre.



Figure 10 : Fibrillation auriculaire. L'activité du myocarde au niveau des oreillettes est complètement désorganisée : on n'observe donc pas d'activité auriculaire précise (onde P) mais un bruit permanent. Quelques influx électriques sont cependant conduits par le nœud AV, et aboutissent à une systole ventriculaire normale mais irrégulière.

- La *fibrillation ventriculaire* (Figure 11) est l'équivalent physiologique de la fibrillation auriculaire, mais transposée aux ventricules : les ventricules se déchargent alors de manière totalement désynchronisée, et il n'y a plus de systole cardiaque. Une fibrillation ventriculaire constitue donc une arythmie particulièrement grave, puisqu'elle est une menace de mort imminente : en effet le cœur n'assure plus du tout son travail de pompe, le sang ne circule plus, ce qui conduit à une asphyxie de tous les tissus du corps, dont le myocarde lui-même. Sans une intervention (défibrillation) immédiate, susceptible de re-synchroniser la dépolarisation des cellules du myocarde et faire ainsi « repartir » le mouvement cardiaque, la mort s'ensuit. Les personnes qui présentent de tels risques peuvent aujourd'hui bénéficier de l'implantation d'un défibrillateur : placé au niveau du thorax, comme un pacemaker, il est muni d'une sonde qui peut détecter l'anomalie rythmique et conduire l'appareil à délivrer une forte décharge électrique.

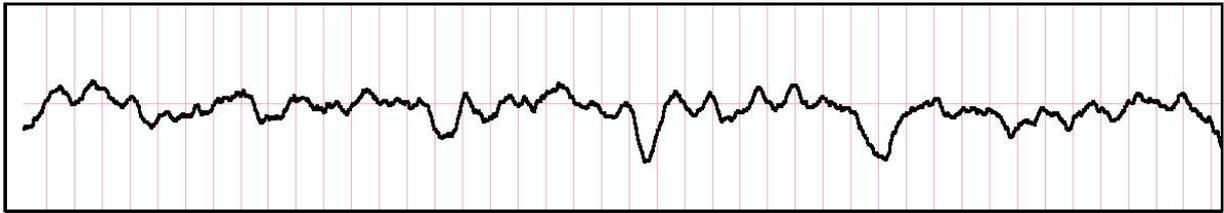


Figure 11 : Fibrillation ventriculaire. L'activité cardiaque est totalement désynchronisée : les ventricules ne se contractent donc plus de manière efficace. L'alimentation en oxygène des tissus n'étant plus assurée, une intervention d'urgence est impérative.

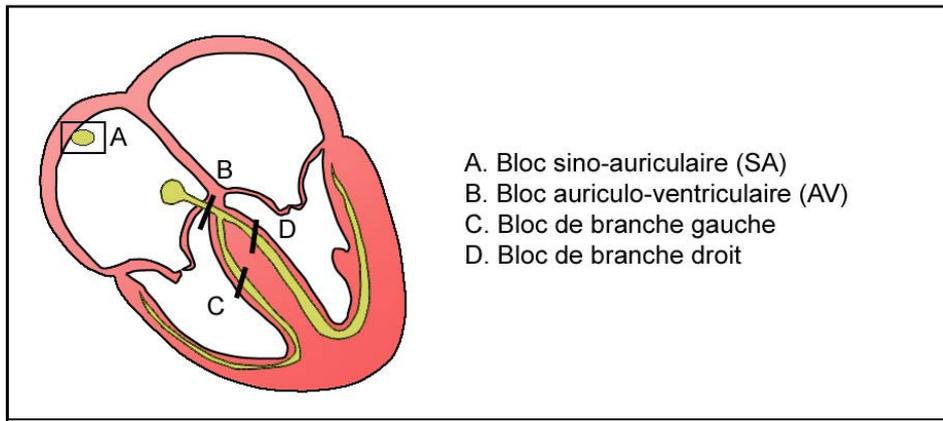
II.2.4 Les Blocs

Le *bloc* est un exemple de problèmes de conduction. C'est un défaut localisé de propagation de l'impulsion électrique dans le tissu cardiaque. Lorsqu'il est complet, c'est-à-dire que l'absence de conduction est totale, des pacemakers de réserve comme un foyer ectopique auriculaire (Figure 8), ou le nœud AV, peuvent prendre le relais et entraîner des bradycardies ou tachycardies, comme étudié au paragraphe précédent. A l'inverse, lorsqu'il apparaît de manière sporadique, suivant le cas, il peut se manifester par des troubles du rythme : on observe alors une irrégularité.

Au niveau des voies de conduction rapide de l'influx nerveux dans le cœur, il existe essentiellement trois types de « blocs » classés suivant leurs localisations (Figure 12): le *bloc sino-auriculaire* (SA) situé entre le sinus et les oreillettes, le *bloc auriculo-ventriculaire* (AV) entre les oreillettes et les ventricules, et le *bloc de branche (droit et/ou gauche)* au niveau de la transmission à chacun des deux ventricules ; ce sont surtout les deux premiers (blocs SA et AV) qui sont susceptibles d'entraîner des troubles du rythme.

Notons que n'importe quelle partie du myocarde peut constituer un « bloc », par dégénérescence ou mort cellulaire, dans une zone infarctée^V par exemple, et un tel bloc peut modifier la propagation de l'influx nerveux en créant des zones de réverbération des ondes à l'origine d'éventuelles boucles, qui, comme évoqué plus haut, peuvent engendrer une arythmie.

^V Une zone infarctée est une zone qui a subi un infarctus, c'est-à-dire une zone dans laquelle les cellules musculaires sont mortes car elles ont été privées d'oxygène pendant un certain temps.



- A. Bloc sino-auriculaire (SA)
- B. Bloc auriculo-ventriculaire (AV)
- C. Bloc de branche gauche
- D. Bloc de branche droit

Figure 12 : Localisation des blocs standard le long des voies de conduction rapide de l'influx nerveux. Les blocs sont des défauts de conduction ; on les classe suivant leur localisation. S'ils sont complets, c'est-à-dire permanents, l'impulsion n'est plus transmise d'une région à l'autre du cœur ; dans ce cas, des foyers ectopiques, sortes de pacemakers de réserve, prennent le relais.

II.2.4.a Bloc sino-auriculaire (SA)

Dans le cas du bloc SA, l'impulsion électrique issue du sinus n'est pas transmise aux oreillettes ; les muscles auriculaires et ventriculaires ne se contractent donc pas. Sur l'ECG, on observe l'absence d'un battement là où régulièrement il devrait y en avoir un. De plus, si le bloc est bien installé, il est possible que plusieurs impulsions du sinus ne soient pas transmises ; dans un tel cas, on observe souvent la prise de relais par un ou des pacemakers de réserve (foyers ectopiques) décrits précédemment.

II.2.4.b Bloc auriculo-ventriculaire (AV)

Dans le cas d'un bloc AV, l'influx se propage correctement au niveau des oreillettes mais n'est pas transmis aux ventricules : la contraction des oreillettes n'est donc pas suivie de la contraction des ventricules. Ce type de bloc est habituellement caractérisé par son degré de sévérité :

Un *bloc AV d'ordre I* correspond à l'allongement de la distance PR, c'est-à-dire que la conduction entre les oreillettes et les ventricules s'effectue difficilement, lentement, mais n'est pas absente. Chaque onde P est donc suivie d'un complexe QRS ; le rythme est régulier.

Un bloc AV d'ordre II bloque certaines impulsions issues des oreillettes, qui ne donnent alors pas naissance à des contractions ventriculaires (Figure 13) ; le tracé ECG présente de temps en temps des ondes P isolées, non suivies de complexes QRS.

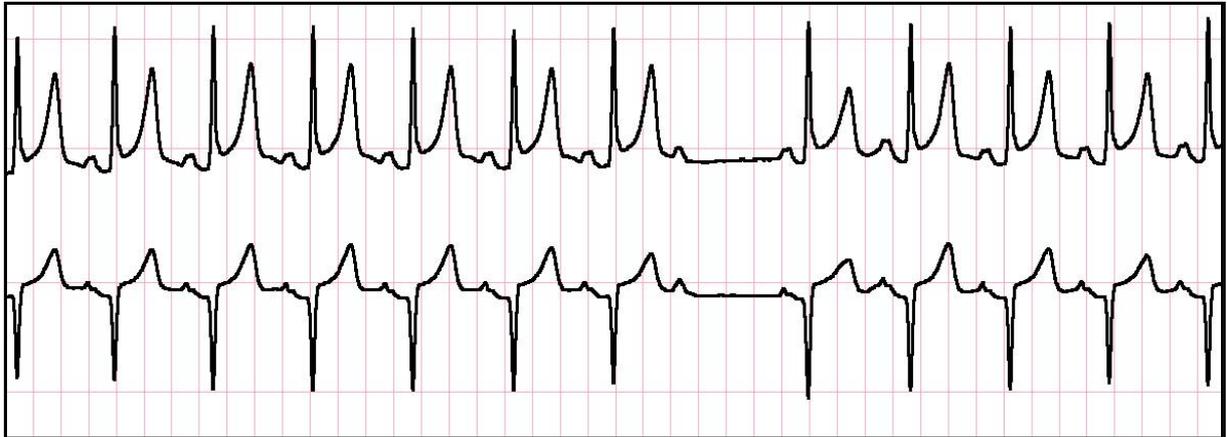


Figure 13 : Bloc AV d'ordre II. Le rythme est sinusal à une fréquence de 80 bpm, seul une onde P (contraction auriculaire) n'est pas suivie d'une systole ventriculaire, ce qui signe un bloc AV d'ordre II. Le rythme apparaît donc localement irrégulier.

Un bloc AV d'ordre III correspond à l'absence totale de conduction entre les oreillettes et les ventricules. Les activités de ces deux parties du cœur, habituellement corrélées, sont, dans ce cas, totalement indépendantes. Le sinus continue à assurer la régularité des battements auriculaires, mais l'absence de transmission de l'influx auriculaire vers les ventricules conduit un foyer ectopique, au niveau du nœud jonctionnel (AV) ou au niveau ventriculaire, à prendre la commande des ventricules, ce qui, selon les cas, peut introduire un rythme régulier ou non, mais assurément plus lent que le rythme sinusal (Figure 5).

Les irrégularités du rythme sont donc principalement observables durant les blocs AV I et AV II, et surtout lors d'une situation intermédiaire où l'on repère une période dite de Wenckebach, qui correspond à un allongement périodique de la distance PR aboutissant à une onde P non conduite, suivie d'une onde P conduite, etc. Cette pathologie introduit ainsi une irrégularité régulière du rythme.

L'étude du rythme et de la régularité des battements sur un ECG permet donc d'orienter efficacement un diagnostic : bradycardie, tachycardie, blocs, foyers ectopiques,...

Mais la caractérisation du type de pathologie nécessite une étude plus précise des ondes constituant chaque battement. Par exemple l'absence ou non d'une onde P permet de différencier un bloc SA d'un bloc AV, la forme du complexe QRS indique si une bradycardie est jonctionnelle ou d'échappement ventriculaire...

Une analyse et une reconnaissance des ondes caractéristiques apparaissent donc comme un complément indispensable à l'étude du rythme, pour réaliser un traitement automatique du signal ECG qui soit un véritable auxiliaire pour la pose d'un diagnostic complet.

III Diagnostic à partir des ondes

Grâce à la puissance des ordinateurs modernes, de nouvelles méthodes de traitement du signal ont vu le jour pour analyser, outre le rythme, *la forme* des ondes de chaque battement. Cette analyse reste pour l'instant essentiellement limitée à la forme de l'onde R, même si elle commence à permettre le repérage de troubles de la repolarisation à partir de la forme de l'onde T. L'avantage d'une étude individuelle de chacune des ondes, en y incluant l'analyse de l'onde P, est qu'elle permettra de réaliser un véritable pré-diagnostic sur la base de la connaissance experte, grâce à la localisation de l'origine du problème lorsque les battements cardiaques ne sont pas normaux. En effet, nous avons vu que chaque onde correspond à une activité spécifique d'une partie du cœur (cf. Chap.1.II.3 Trace électrique du cœur).

III.1 L'onde P

III.1.1 Forme de l'onde P

L'onde P traduit la dépolarisation auriculaire. Lorsque le signal qui déclenche cette dépolarisation provient toujours de la même origine (normalement, le sinus) sa forme ne varie pas tout au long de l'enregistrement ; on l'observe habituellement positive sur les deux premières dérivations Holter (avec les électrodes en position standard).

Une onde P de forme variable peut révéler la présence d'un (ou de plusieurs) foyer(s) ectopique(s) auriculaire(s). Lorsqu'un tel foyer se manifeste de manière sporadique et rare, le

tracé de l'ECG présente des battements prématurés d'origine auriculaire (dits Extra-Systoles SupraVentriculaires, ou ESSV) (cf. II.2.2. Foyer ectopique auriculaire) ; s'il s'exprime fréquemment, il peut remplacer alors le sinus pendant plusieurs battements. Le tracé présente alors une succession de battements dont la forme de l'onde P varie (Figure 14), avec ou sans éventuelles conséquences sur la fréquence et le rythme ventriculaires (cf. II.1.2.b Tachycardie auriculaire)



Figure 14 : Foyer ectopique auriculaire. Pendant 6 battements, un foyer ectopique auriculaire a remplacé le sinus. La forme de l'onde P est clairement différente pendant cette période, puisqu'elle apparaît inversée ; dans cet exemple, le rythme introduit par le foyer ectopique est très proche de celui observé lors de battements sinusaux, ce qui rend la détection de ce type d'anomalie difficile par la seule étude du rythme (on note toutefois le repos compensatoire après la salve d'ESSV, qui, si l'alternance sinus/foyer ectopique est fréquente, peut introduire une irrégularité du rythme).

La durée de l'onde P est habituellement inférieure à 80 ms ; des ondes P anormalement larges ou anormalement amples traduisent une dilatation d'une des oreillettes, symptôme qui ne nécessite pas en soi un traitement particulier, mais qui est souvent révélateur d'un problème sous-jacent d'hypertension artérielle pulmonaire, d'insuffisance cardiaque ou d'une valvulopathie (mitrale, tricuspide ou aortique), par exemple.

III.1.2 Intervalle PQ

La distance entre l'onde P et le complexe QRS est mesurée entre le début de l'onde P et le début de l'onde Q (Figure 2). Celle-ci est normalement comprise entre 120 ms et 200 ms, et reste fixe quelle que soit la fréquence (elle correspond en effet au temps de dépolarisation du nœud AV, qui est une constante physiologique).

Les causes d'un intervalle mesuré inférieur à 120 ms sont généralement les suivantes :

- Un rythme jonctionnel auriculo-ventriculaire (AV) : la dépolarisation des ventricules est initiée dans la jonction AV. Le rythme est en général lent (bradycardie jonctionnelle) et l'onde se propage de manière rétrograde dans les oreillettes en même temps qu'elle se propage dans les faisceaux de His vers les ventricules, ce qui cause une onde P tout juste collée au complexe QRS, ou invisible car noyée dans ce complexe (cf. II.1.1.b Bradycardie d'origine jonctionnelle).
- Une deuxième cause possible est le syndrome de Wolff-Parkinson-White (WPW) : les patients atteints d'un tel syndrome possèdent, entre les oreillettes et les ventricules, une *voie de conduction accessoire* qui est plus rapide que le nœud AV (Figure 15). La courte pause normalement introduite à ce niveau disparaît alors (cf. chap.1 I-2.2 Fonctionnement électrique du cœur), de sorte que les ventricules se dépolarisent juste après la dépolarisation auriculaire ; ce phénomène se traduit par l'observation d'un intervalle PQ plus court que normal. Le risque majeur induit par cette pathologie réside dans le passage possible du rythme cardiaque en tachycardie de fréquence très élevée (par mécanismes de bouclage de l'impulsion électrique), avec de possibles conséquences hémodynamiques et perte de connaissance.

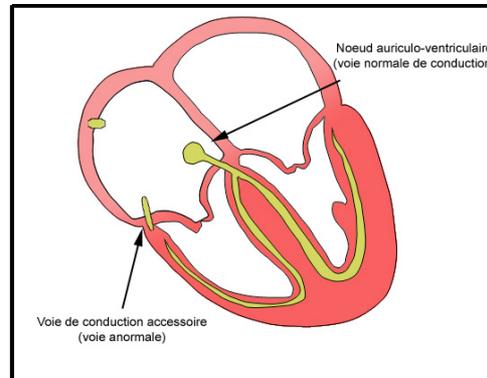


Figure 15 : Syndrome de Wolf-Parkinson-White. Les patients ont une voie accessoire de conduction entre les oreillettes et les ventricules, ici le ventricule droit. L'impulsion électrique issue du sinus se propage également donc aux ventricules par cette nouvelle voie, tandis que le nœud AV introduit normalement une courte pause dans la propagation de l'impulsion, ce qui facilite le remplissage sanguin des ventricules ; ici, l'impulsion est directement transmise aux ventricules hors des voies de conduction normale, ce qui peut se traduire par un élargissement du complexe QRS.

Notons qu'il existe des variantes de ce type de pathologie impliquant une voie accessoire ; le lecteur intéressé pourra se reporter à [Houghton, 1997].

- Dans le cas inverse, où l'intervalle PQ est supérieur à 200 ms, et où chaque onde P est bien suivie d'un complexe QRS, on peut suspecter un bloc AV d'ordre I ; si certains complexes QRS manquent, on diagnostique alors un bloc d'ordre supérieur. Le fait de pouvoir localiser les différentes ondes indépendamment les unes des autres permettra de suivre l'évolution temporelle des distances entre les ondes comme cette distance PR, de préciser la fréquence d'occurrence de l'apparition de blocs AV, et ainsi de mieux spécifier leur ordre.

Le fait que l'amplitude de l'onde P soit relativement faible par rapport à celles de R et T rend sa détection et sa caractérisation difficiles. Nous mettrons l'accent sur cette détection dans le présent travail, en raison de l'apport diagnostique majeur qu'elle pourra constituer.

III.2 Le complexe QRS

C'est la partie du battement la plus simple à repérer, en raison de l'amplitude dominante de l'onde R ; c'est pourquoi la détection automatique des ondes R est celle qui a été réalisée en premier : c'est aujourd'hui l'analyse la plus aboutie.

III.2.1 La forme du complexe

Les analyses précises de l'onde R nécessitent un enregistrement clinique de l'activité cardiaque sur 12 dérivations, dont, en particulier, les dérivations dites « *thoraciques* » qui permettent une mesure locale de l'activité électrique cardiaque. Par exemple, l'identification et la localisation d'un infarctus du myocarde ou d'une hypertrophie ventriculaire s'effectuent à partir de l'ensemble de ces 12 dérivations, par comparaison des différents tracés entre eux (et avec des tracés précédents, si possible). L'enregistrement Holter sur 3 voies ne permet pas de mesure locale de l'activité cardiaque, mais la mesure globale selon trois dimensions permet tout de même de repérer et parfois même de localiser (grâce à la reconstruction possible du vecteur électrique du cœur) la majeure partie des pathologies, même si certaines ne peuvent pas être précisées. En effet, bien que tous deux repérable sur un enregistrement holter, les *blocs de branche* droit et gauche ne peuvent être distingués l'un de l'autre, tandis qu'une telle distinction est possible sur l'ECG 12 dérivations. On parle de bloc de branche lorsque l'une des branches du faisceau de His ne conduit pas l'impulsion électrique issue du nœud auriculo-

ventriculaire avec la même efficacité que l'autre. Dans le ventricule correspondant à la branche bloquée, l'impulsion électrique arrive donc en retard par rapport à l'autre : on observe alors sur le tracé une onde R plus large, correspondant à l'activité successive et non simultanée de chacun des ventricules, en revanche le rythme est régulier car il reste contrôlé par le sinus (Figure 16). Un bloc de branche peut-être qualifié de partiel ou total en fonction du degré d'inefficacité de la transmission le long de la branche en question. Notons aussi que, indépendamment de l'absence de distinction entre les deux blocs de branches gauche et droit lors d'un enregistrement Holter, selon l'algorithme de lecture du signal, il existe un risque de confusion entre une onde R avec bloc de branche et une onde R d'extra-systole ventriculaire (ESV), à cause de l'élargissement de l'onde observée dans les deux cas. Mais, dans le cas général, les algorithmes d'analyse de la forme de l'onde R permettent en général de différencier efficacement les complexes QRS normaux (y compris avec une variante de type « bloc de branche ») des extrasystoles ventriculaires (ESV).



Figure 16 : Bloc de branche. Il y a ici un problème de conduction de l'impulsion électrique dans le faisceau de His. La contraction des deux ventricules n'est donc pas parfaitement simultanée, ce qui s'observe par deux pics successifs correspondant aux deux ventricules. La durée totale de l'onde R est donc ici plus longue que lors des battements normaux.

III.2.2 L'intervalle QT

L'intervalle QT est mesuré entre le début de l'onde Q et la fin de l'onde T (Figure 2). Cet intervalle est variable, fonction de la fréquence cardiaque ; le calcul de l'intervalle QT corrigé (QTc) s'avère donc utile pour dresser un diagnostic : proportionnel au QT mesuré divisé par la racine du rythme, le QTc, invariant quel que soit le rythme, doit être compris entre 350 et 430 ms. Il existe des causes extra-cardiaques au fait que le QTc soit hors de ces limites :

lorsque que le QTc est inférieur à cette limite, le patient peut présenter une hypercalcémie^{VI} ou une hyperthermie ; à l'inverse, lorsqu'il est supérieur à 430 ms, le patient peut être atteint d'hypocalcémie^{VI}. Il existe aussi des causes cardiaques : par exemple, lorsqu'un patient est atteint de la maladie dite du « QT long », il est important de le diagnostiquer, car il existe pour lui un risque de passage en TV (II.1.2.c Tachycardie ventriculaire) : en effet, le QT long est susceptible de favoriser un phénomène appelé *R sur T*, où une dépolarisation ventriculaire due à une ESV commence tandis que la repolarisation du battement précédent n'est pas encore terminée. Ce phénomène est facilement générateur de boucles de conduction à l'origine de TV.

III.3 L'onde T

L'onde T correspondant à la repolarisation ventriculaire, l'interprétation précise de sa forme en termes de pathologies est facilitée par un enregistrement sur 12 dérivations, comme pour l'onde R.

III.3.1 Forme de l'onde T

Il n'existe pas de domaine de normalité clairement défini concernant la hauteur de l'onde T, si ce n'est qu'elle est normalement positive sur les deux premières dérivations Holter.

Une hyperkaliémie^{VII}, ou le stade précoce d'un infarctus myocardique, peuvent être la cause d'amplitudes anormalement grandes de l'onde T ; ces deux pathologies nécessitant un traitement d'urgence. Les causes d'une faible amplitude sont l'hypokaliémie^{VII} par exemple, qui demande elle aussi parfois, dans les cas sévères, un traitement d'urgence. Mais dans l'un et l'autre cas, on s'intéressera à la modification de cette amplitude, par rapport à un enregistrement précédent par exemple : il existe en effet des variantes de la normalité avec de grandes ondes T ou même des ondes T quasi-inexistantes.

L'inversion de l'onde T sur l'une des deux premières dérivations peut être considérée comme anormale, et peut être la trace d'une zone ischémisée dans le myocarde (trace d'un infarctus ancien) ou d'un début d'ischémie (si accompagnée de douleurs thoraciques, angines de poitrine, ...) (Figure 17). À partir de la seule analyse de l'ECG, il n'est pas possible d'établir

^{VI} Hypercalcémie : excès de calcium dans le sang / Hypocalcémie : carence de calcium dans le sang.

^{VII} Hyperkaliémie : excès de potassium dans le sang / Hypokaliémie : carence de potassium.

un diagnostic différentiel de ces pathologies et de l'hyperventilation ou de l'embolie pulmonaire, qui peuvent également induire une inversion de l'onde T.



Figure 17 : Inversion de l'onde T sur la première dérivation Holter. Le dossier du patient indique la présence d'une zone ischémisée conséquence d'un petit infarctus.

L'absence de critère objectif sur la normalité ou non de l'amplitude de l'onde T, l'obligation de connaissance de la clinique et d'autres examens, et la nécessaire comparaison avec des ECG plus anciens ne rendent pas possible l'établissement d'un « diagnostic automatique » à partir de l'analyse de l'onde T : dans ce cas, l'apport spécifique d'une telle analyse réside dans la possibilité d'un suivi temporel de paramètres descriptifs de sa forme.

III.3.2 L'intervalle ST

En revanche, l'étude de l'intervalle ST se prête mieux à une approche informatique, car des critères de normalité sont clairement définis ; les dernières versions du logiciel Synetec possèdent un module d'analyse de la position du tracé de cet intervalle par rapport à la ligne de base.

L'intervalle est repéré entre la fin de l'onde S et le début de l'onde T, et, en l'absence de pathologie, doit lui correspondre un segment linéaire d'amplitude constante et nulle (au niveau de la ligne isoélectrique du cœur ou ligne de base) ; les observations d'un sur-décalage ou d'un sous-décalage (Figure 18) par rapport à cette ligne sont en général associées à une souffrance cardiaque par hypoxie (début d'ischémie), en particulier lorsque ces décalages sont variables au cours du temps (lors d'un effort ou, au contraire, dans une phase de sommeil par exemple).

Ainsi, la surélévation du segment ST peut s'observer dans des situations diverses, depuis une variante de la normale, jusqu'à un risque vital comme le risque d'un infarctus du myocarde. Comme dans l'analyse de l'onde T, des informations complémentaires à l'enregistrement Holter sont nécessaires pour permettre l'établissement d'un diagnostic, et l'information contenue dans un ECG 12 dérivations constitue l'une de ces informations complémentaires.

Mais, plus encore que dans le cas de l'onde T, le suivi temporel des caractéristiques de ce segment, en particulier de sa position par rapport à la ligne de base, constitue un élément d'information tout à fait majeur.



Figure 18 : Sous décalage ST. Entre le complexe QRS et l'onde T, le segment est à un potentiel négatif par rapport au niveau de la ligne de base. Il s'agit d'un sous décalage ST trace, ici, d'un infarctus passé.

La sous-élévation d'un segment ST peut également traduire une souffrance cardiaque, comme pour la surélévation, mais aussi une interaction médicamenteuse, par exemple ; là encore l'étude précise du dossier médical du patient est obligatoire pour poser le diagnostic.

L'étude de cet intervalle est donc fondamentale pour attirer l'attention du praticien sur le risque d'apparition de pathologies potentiellement majeures.

Résumé :

L'analyse automatique du tracé Holter comme elle est effectuée depuis déjà quelques années permet de mettre en évidence un grand nombre de pathologies cardiaques, notamment celles où *la fréquence cardiaque* et/ou *la régularité des battements* sont anormales, (*bradycardies, tachycardies, bigéminismes, ..*). De plus une étude simple de la forme des complexes QRS permet de distinguer les complexes d'origine supraventriculaire des *extrasystoles ventriculaires*.

Cependant la caractérisation précise des pathologies sous jacentes aux anomalies détectées n'est pas encore vraiment accessible, car elle nécessite, en général, l'analyse de la présence des ondes autres que le QRS. Citons, par exemple, la distinction entre une *bradycardie sinusale* et une *bradycardie jonctionnelle* qui impose l'analyse de la présence ou non de l'onde P. En outre, toutes les pathologies qui se traduisent uniquement par des distances anormales entre les ondes et/ou des absences d'ondes ne peuvent aujourd'hui être décelées automatiquement^{VIII}.

Ainsi, la méthode proposée dans ce qui suit, permettant un repérage précis et continu de *toutes les ondes* caractéristiques P, Q, R, S et T du battement, devra permettre de localiser plus précisément *toutes les zones du signal susceptibles de porter la trace d'un comportement anormal du cœur* sur les 24 heures de l'enregistrement Holter.

^{VIII} Notons l'exception de la pathologie dite du « QT long » que le logiciel Synetec permet de détecter.