

Introduction à l'ECG

Juan Sztajzel

Service de Cardiologie

Hôpitaux Universitaires Genève

Dépolarisation et repolarisation du coeur

Types de cellules cardiaques

Il existe 2 types de cellules morphologiquement et fonctionnellement différentes dans le cœur humain: les cellules contractiles et les cellules spécialisées. Les premières sont responsables de la contraction du myocarde auriculaire et ventriculaire, les deuxièmes sont celles qui génèrent et conduisent les impulsions électriques. Ces dernières constituent le système de conduction cardiaque, qui comprend le nœud sinusal (NSA), la jonction auriculo-ventriculaire (AV) et le système de conduction intra-ventriculaire. Elles sont constituées par les cellules du NSA, à conduction lente et qui représentent le pacemaker du cœur, par les cellules du faisceau de His et par les cellules de Purkinje, à conduction rapide, et les cellules de transition qui sont hétérogènes.

Propriétés

Les propriétés de ces cellules sont l'automatisme, l'excitabilité et la conduction. L'automatisme cardiaque est le fait de générer spontanément des impulsions qui peuvent être propagées. L'automatisme maximal est trouvé dans les cellules du NSA, c'est-à-dire le pacemaker du cœur, et lors défaillance de ce dernier, un pacemaker subsidiaire prend le relais, celui du noeud atrio-ventriculaire (NAV). Le taux de décharge d'une cellule automatique dépend du temps que met la dépolarisation diastolique spontanée (potentiel transmembranaire diastolique ou potentiel de repos) pour atteindre un potentiel seuil donnant naissance au potentiel d'action (PA). L'excitabilité est la propriété des cellules cardiaques de répondre aux impulsions électriques. Ainsi, les cellules automatiques génèrent elles-mêmes les impulsions, alors que les cellules contractiles sont stimulées par des impulsions propagées par les cellules adjacentes. Il existe différentes phases de l'excitabilité différenciées par le PA des cellules cardiaques et composées de diverses périodes réfractaires: période réfractaire absolue, période réfractaire effective, période réfractaire relative, et temps de récupération. Les diverses périodes réfractaires correspondent au temps requis par les cellules pour retrouver leur excitabilité. L'excitabilité cardiaque dépend du niveau du seuil de dépolarisation qui plus il est élevé, potentiel moins négatif, moins le tissu est excitable. Elle dépend aussi de la durée des périodes réfractaires: plus elles sont longues, moins un potentiel physiologique ou pathologique a des chances d'être obtenu ou plus elles sont réduites, plus vite la cellule cardiaque redevient excitable. La conduction représente la capacité des cellules cardiaques de conduire les impulsions électriques aux cellules voisines. Il existe 2 types de conduction: conduction régénérative (cellules à réponse rapide) et conduction décrémenteille (cellules à réponse lente). Les vitesses de conduction normales dans les différentes structures cardiaques sont les suivantes: oreillettes (1 à 2 m/s), NAV (0.02 à 0.05

m/s), système HIS-Purkinje (1.5 à 3.5 m/s) et ventricules (0.4 m/s). La vitesse de conduction dépend de la rapidité de déclenchement du PA (dV/dt de la phase O), qui est rapide dans les cellules à réponse rapide et lente dans celles à réponse lente, ainsi que des caractéristiques ultrastructurelles des fibres. La conduction dans les fibres fines (cellules contractiles et de transition) est plus lente que dans fibres épaisses (cellules de Purkinje).

Activation cellulaire

Au repos, pendant la diastole électrique, il existe un équilibre entre les charges positives à l'extérieur et les négatives à l'intérieur des cellules. Les charges positives à l'extérieur des cellules sont dues au sodium (Na^+) et au calcium (Ca^{2+}). Les charges négatives à l'intérieur des cellules sont dues à certains anions, tels aspartate et glutamate, malgré la présence de ions positifs de potassium (K^+). Cette polarisation génère une différence de potentiel électrique appelée potentiel transmembranaire diastolique ou potentiel de repos (-70 à -90 mV). Les cellules du système de conduction possèdent une dépolarisation diastolique spontanée leur permettant d'atteindre par des changements de la conductance du K^+ , Na^+ et Ca^{2+} un potentiel seuil donnant ainsi naissance au PA, et expliquant par là l'origine de l'automatisme cardiaque. Les cellules du NSA possèdent le plus haut degré d'automatisme, alors que celles du NAV et de Purkinje ont un degré d'automatisme moins grand. La stimulation d'une cellule ou d'une structure, pendant la systole électrique, va engendrer à partir du potentiel transmembranaire diastolique la naissance du PA qui comprend les 4 phases du processus de dépolarisation et de repolarisation. La morphologie du PA dans les cellules contractiles présente une ascension rapide alors que dans les cellules du système de conduction l'ascension est plus ou moins lente (figure 4.1 et 4.2).

Durant la phase de dépolarisation (phase 0 et 1 du PA, passage de -90 à $+20$ mV) aussi bien de la cellule myocardique isolée que dans tout le ventricule gauche que l'on peut considérer comme une cellule unique, il se produit une perte des charges électriques positives à l'extérieur de la cellule, celles-ci passant à l'intérieur de la cellule, d'abord à travers les canaux rapides de Na^+ , puis à travers les canaux lents de $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$. Cette phase de dépolarisation est suivie par la phase 2 qui forme un plateau et par la phase 3 descendante. Le K^+ entre en jeu surtout pendant cette phase 3, avec un important courant sortant qui dure jusqu'à la fin de la repolarisation.. La phase 3 se caractérise par la sortie à l'extérieur de la cellule de charges positives de K^+ pour compenser la négativité extracellulaire. A la fin de la phase 3, l'équilibre électrique est atteint. Finalement, afin de rétablir l'équilibre ionique un mécanisme actif de pompe ionique (début de la phase 4) fera passer le Na^+ et le Ca^{2+} à l'extérieur et le K^+ à l'intérieur de la cellule (figures 4.1 et 4.2).

Voies de conduction et séquence d'activation cardiaque

Voies de conduction

Le NSA (nœud de Keith et Flack), situé à la jonction de la veine cave supérieure et de l'oreillette droite, est irrigué par l'artère du même nom, branche de l'artère coronaire droite (60 %) ou de l'artère circonflexe (40 %). Le NSA est composé de trois types de cellules (cellules nodales génératrices de l'influx sinusal normal, cellules transitionnelles assurant la distribution de l'influx sinusal au myocarde auriculaire et cellules musculaires atriales) et reçoit une riche innervation sympathique et parasympathique, essentiellement à prédominance droite. Les voies internodales (faisceaux internodal antérieur, moyen et postérieur), composées de cellules myocardiques atriales, relient le NSA au NAV. Le NAV (nœud de Tawara) est situé juste sous l'endocarde de

l'oreillette droite, dans le septum interauriculaire, antérieurement à l'ostium du sinus coronaire, et au-dessus de l'insertion du feuillet septal de la tricuspide. Il est irrigué par une branche de la coronaire droite dans 90 % des cas et est composé de quatre types de cellules qui reçoivent une riche innervation sympathique et parasympathique (cellules transitionnelles, nodales moyennes, nodales basses, et de type Purkinje). Le faisceau de His et ses branches prend naissance au niveau de la partie distale du NAV. Il est constitué de fibres de Purkinje alignées en bandes longitudinales, séparées par du collagène, et irrigué par des branches de l'artère coronaire droite et de l'artère interventriculaire antérieure. Du faisceau de His partent la branche droite (se divisant en un réseau sous-endocardique à la base du muscle papillaire antérieur) et la branche gauche (se subdivisant rapidement en plusieurs rameaux sans constituer de véritables faisceaux individualisés, tout au moins sur le plan anatomique pur). Les fibres de Purkinje forment un réseau sous-endocardique complexe, chargé de transmettre l'influx cardiaque quasi simultanément à l'ensemble du myocarde.

Les voies accessoires sont des faisceaux de fibres myocardiques qui peuvent relier l'oreillette au ventricule directement au travers de l'anneau fibreux sans traverser le nœud AV (faisceau de Kent), des faisceaux court-circuitant le NAV normal (faisceau atrio-nodal ou atriohisien) ou des faisceaux reliant le NAV ou le faisceau de His directement au ventricule (faisceau nodo- ou fasciculo-ventriculaire, fibres de Mahaim).

Séquence d'activation cardiaque

Le stimulus électrique prend naissance au niveau du NSA et est transmis à tout le cœur par le système spécifique de conduction à partir des cellules atriales jusqu'aux cellules ventriculaires. Le stimulus sinusal dépolarise les oreillettes en commençant par la partie latérale droite de

l'oreillette droite, suivant un parcours anti-horaire en dépolarisant le septum interauriculaire et s'achevant au niveau de l'oreillette gauche. L'onde de dépolarisation auriculaire arrive au niveau du NAV et se propage lentement dans sa portion haute et médiane. Elle accélère ensuite sa conduction dans la partie basse du NAV et au niveau du faisceau de His, continuant à droite par la branche droite et à gauche par la branche gauche. La dépolarisation ventriculaire commence en même temps dans 3 points différents du ventricule gauche. Ces 3 points correspondent aux régions d'insertion des faisceaux supéro-antérieur, inféro-postérieur et des fibres médio-septales de la branche gauche. Une fois cette région initiale dépolarisée, commence la dépolarisation de la grande partie de la masse ventriculaire droite et gauche. La dépolarisation se termine par les régions les moins riches en fibres de Purkinje, à savoir les régions basales et septales hautes. La région sous-endocardique est de manière physiologique moins bien vascularisée réalisant par là une situation d'ischémie physiologique. Ainsi, la repolarisation commence toujours dans les régions myocardiques les mieux irriguées, à savoir au niveau sous-épocardique.

Electrocardiographie du cœur normal

L'électrocardiogramme (ECG) est l'enregistrement de l'activité électrique du cœur se déplaçant dans le temps et correspondant à la dépolarisation et la repolarisation du myocarde.

On enregistre pour chaque cycle cardiaque de manière successive la courbe de dépolarisation auriculaire, l'onde P, la courbe de dépolarisation ventriculaire, le complexe QRS, et la courbe de repolarisation ventriculaire, l'onde T. L'intervalle entre les courbes de chaque cycle est variable et dépend de la fréquence cardiaque et correspond à la phase de repos cellulaire. La repolarisation auriculaire ne se voit pas sur l'ECG à cause des forces générées par le complexe QRS et la repolarisation ventriculaire, onde T. La dépolarisation ventriculaire se fait

en 3 phases successives responsables de la formation de 3 vecteurs, les ondes Q, R et S. Le premier vecteur se dirige en avant et à droite. Il est responsable de l'onde q dans les dérivations du ventricule gauche (DI, aVL, V1-V6). L'onde S représente la dépolarisation du ventricule droit. La repolarisation ventriculaire est représentée par le segment ST et l'onde T. Comme la dépolarisation, la repolarisation dépend fondamentalement de la repolarisation de la paroi libre du ventricule gauche.

Considérant que la région sous-endocardique souffre d'ischémie physiologique, le dipôle de repolarisation de l'ECG humain commence dans la région sous-épicaudique et progresse ensuite dans la région sous-endocardique. Pour cette raison, une électrode située dans la région sous-épicaudique enregistrera une déflexion positive bien que le dipôle de repolarisation s'éloigne de l'électrode. Ceci explique que l'onde T est positive dans les dérivations qui regardent le ventricule gauche et négative dans celles qui sont opposées (par exemple aVR).

Dérivations cardiaques

L'ECG s'enregistre à partir de divers points (dérivations) donnant naissance à des courbes de morphologies différentes, toujours dans l'ordre: onde P, complexe QRS et onde T. La courbe électrocardiographique va présenter des morphologies différentes selon où est placée l'électrode qui enregistre. Les endroits où sont placées les électrodes correspondent aux différentes dérivations. Les courbes de l'ECG peuvent ainsi être ou positives (ondes R) ou négatives (QS). Comme le cœur est un organe tri-dimensionnel, il est nécessaire de connaître les projections des vecteurs représentatifs de l'activité cardiaque sur tous les plans, frontaux et horizontaux, telle une photo que l'on prend à partir de plusieurs points de vue. On utilise pour faire un ECG les 12 dérivations de base: 6 dérivations sur le plan frontal et 6 sur le plan horizontal. Les dérivations

frontales (dérivations de Goldberg) comprennent 3 électrodes bipolaires (I, II et III) et 3 monopolaires (aVR, aVL et aVF; a = augmented, R = right, L = left, F = foot). Les 3 dérivations bipolaires ont tout d'abord été décrites et considérées par Einthoven comme un triangle (triangle d'Einthoven) en forme d'un circuit fermé, où selon la loi de Kirchhoff $II = I + III$. Bailey en déplaçant les 3 côtés du triangle d'Einthoven au centre de ce même triangle obtenait une figure de référence appelée système triaxial de Bailey. La combinaison dans le plan frontal des dérivations bipolaires et monopolaires constituent le système hexaxial de Bailey (figure 4.3).

Dérivations sur le plan frontal

Dérivations bipolaires

Ces dérivations enregistrent l'activité cardiaque entre 2 points du corps. Elles sont placées sur les bras droit et gauche, ainsi que sur le pied gauche. On relève ainsi les différences de potentiel entre les bras gauche et droit (I), pied gauche et bras droit (II) et pied et bras gauches (III). La partie positive de I correspond à 0^0 , celle de II à $+60^0$ et celle de III à $+120^0$. Les parties négatives des 3 dérivations correspondent à $\pm 180^0$, -120^0 et -60^0 , respectivement.

Dérivations monopolaires

Les trois dérivations monopolaires aVR, aVL et aVF ont chacune des lignes allant d'un pôle positif à un pôle négatif en passant par le centre d'un triangle: la ligne d'aVR va de -150^0 (pôle positif) à $+30^0$ (pôle négatif), celle de aVL de -30^0 (pôle positif) à $+150^0$ (pôle négatif) et celle de aVF de $+90^0$ (pôle positif) à -90^0 (pôle négatif).

Dérivations sur le plan horizontal

Les dérivations du plan horizontal (dérivations de Wilson) constituent les dérivations monopolaires et sont au nombre de six (V1 à V6). Ces dérivations ont une partie positive, là où est placée l'électrode exploratrice, et une négative, qui correspond à la région opposée. L'électrode exploratrice est placée sur divers points précordiaux. En plus des dérivations V1 à V6, on peut utiliser dans certaines occasions les dérivations plus droites (V1R à V4R) ou plus gauches (V7 à V9).

Appareils d'enregistrement

Les appareils d'enregistrement inscrivent le tracé sur du papier. De plus en plus, les enregistrements sont digitalisés. Le courant électrique généré par le cœur est conduit à travers les câbles de l'appareil d'enregistrement qui possède un amplificateur de signaux transmis et d'un galvanomètre qui fait bouger une aiguille qui se déplace selon la grandeur du signal électrique généré par le patient et inscrit une déflexion positive, négative ou biphasique.

Techniques d'enregistrement

Le patient doit être couché sur un lit, dans une chambre de température agréable. Les opérations suivantes seront réalisées:

-placer les électrodes périphériques (enregistrement des dérivations du plan frontal: I, II, III, aVR, aVL , aVF) sur les 4 extrémités (rouge bras droit, jaune bras gauche, verte jambe gauche et noire jambe droite) et six précordiales (enregistrement des dérivations précordiales V1 à V6) sur le thorax. Il est important de placer ces dernières électrodes à la bonne place, car on peut créer

des tracés faussement pathologiques, en particulier lorsque les dérivations V1-V2 sont placées trop haut. Ceci crée une onde R en V1 et V2 donnant l'aspect d'un bloc de branche droit.

- ajuster la ligne de base afin d'assurer un enregistrement centré sur le papier.

- contrôler la calibration de l'ECG: hauteur de la déflexion de calibration est de 10 mm (= 1 mVolt).

- enregistrer le déroulement du papier à la vitesse standard de 25 mm/s. La distance entre deux lignes épaisses verticales est de 5 mm et entre deux lignes fines de 1 mm, équivalent à 0.20 s et 0.04 s, respectivement. Dans certaines situations, afin d'avoir des enregistrements plus exactes une vitesse d'enregistrement plus rapide, soit de 50 mm/s est conseillée.

- enregistrer au moins 20 cm de chaque dérivation; si nécessaire enregistrer un bout plus long, s'il s'agit p. ex. d'une arythmie (II ou V1).

- éviter les artéfacts, tremblement p. ex.

Lecture de l'ECG

L'interprétation d'un ECG requiert une étude systématique des différents paramètres: rythme cardiaque, fréquence cardiaque, PR, QT, onde P, complexe QRS, segment ST et onde T, onde U, calcul de l'axe électrique dans le plan frontal (figure 4.5).

Rythme cardiaque

Le rythme normal du cœur est sinusal, car il prend naissance au niveau du nœud sinusal. Il peut dans certaines situations être jonctionnel, idioventriculaire ou être lié à une fibrillation auriculaire. Il se caractérise par une onde P positive en I, II et aVF et V2 à V6, négative en aVR, et parfois aussi en III. En V1 et II, et exceptionnellement en II et aVF, l'onde P peut être

biphasique. En principe, toutes les ondes P sont suivies d'un QRS. Il existe une légère variabilité physiologique entre les intervalles RR, particulièrement marquée chez l'enfant, surtout en relation avec la respiration.

Fréquence cardiaque

La fréquence sinusale au repos se situe entre 60 à 100/minute, on parle de bradycardie sinusale lorsqu'elle est <60/minute et de tachycardie sinusale >100/minute. La fréquence diminue avec le sommeil, et augmente à l'effort, avec le stress, l'émotion ou la fièvre. On peut mesurer la fréquence cardiaque sur le tracé ECG avec une règle d'ECG adéquate ou par une méthode simple qui consiste à diviser le chiffre de 300 par le nombre d'espaces séparés d'une ligne épaisse verticale (= 0.2 s) entre 2 RR consécutifs (vitesse de déroulement de 25 mm/s).

Onde P

L'onde P est arrondie, son hauteur est de 2.5 mm et sa largeur de 0.10 s. Elle est le mieux visible en II ou V1, elle est positive en I et II et en général biphasique en V1.

Intervalle PR

L'intervalle PR représente la durée du début de la dépolarisation auriculaire jusqu'au début de la dépolarisation ventriculaire. Il se raccourcit avec la sympathicotonie et s'allonge avec la vagotonie.

Valeurs normales: 0.12-0.20 s (plus court chez enfant, plus long chez personnes âgées).

Intervalle QT

L'intervalle QT représente la somme de la dépolarisation (QRS) et de la repolarisation (ST)-T). La mesure peut se faire par la formule de Bazett:

$$QTc \text{ (QT corrigé)} = \frac{\text{QT observé}}{\text{Intervalle RR (en s)}}$$

En général, une valeur du QTc >440 millisecondes (ms) est considérée comme pathologique.

Complexe QRS normal

La largeur du QRS normal est ≤ 0.10 s, la hauteur de l'onde R ne doit en général pas dépasser 25 mm dans les dérivations V5 et V6, 20 mm en I ou 15 mm en aVL. On considère un bas voltage lorsque la somme du voltage du QRS en I, II et III est <15 mm, <5 mm en V1-V6, <7 mm en V2 et V5 ou <9 mm en V3-V4. La profondeur de l'onde Q ne doit pas dépasser de 25% la hauteur de l'onde R qui la suit et doit avoir une largeur <0.04 s. Le temps de déflexion intrinsèque (= temps du début du QRS au sommet de l'onde R) ne doit pas être >0.045 s en V5-V6 et >0.02-0.03 s en V1.

Segment ST et ondes T et U

Le segment ST et l'onde T sont enregistrés au cours de la repolarisation ventriculaire. Dans des conditions normales, le segment ST est isolélectrique ou seulement légèrement (0.5 mm) au-dessous ou au-dessus de la ligne isoélectrique. Les points de référence pour mesurer le sus-ou sous-décalage du ST sont les intervalles T-P (ou U-P). Chez les sujets sains avec prédominance vagale (sportifs) le ST peut être élevé et concave vers le haut (repolarisation précoce). On peut

aussi voir une élévation du ST, en général, convexe par rapport à la ligne isoélectrique, dans les précordiales chez des patients avec pectus excavatum ou très maigres.

L'onde T correspond à la partie terminale de la repolarisation ventriculaire. L'onde T normale présente une montée lente avec une descente rapide. Elle peut être cependant symétrique chez beaucoup d'individus, femmes et gens âgés qui n'ont pas de cardiopathie. Elle est positive en I, II, positive, aplatie ou négative III, aVF et aVL, elle est toujours négative en aVR. Les variations de l'onde T représentent l'anomalie ECG la plus fréquemment retrouvée. Elles peuvent être induites par différentes situations physiologiques, divers médicaments, désordres extracardiaques et finalement dans le cadre de l'ischémie myocardique. Chez les femmes obèses, on observe souvent des ondes T aplaties. Chez l'enfant elle est négative dans les précordiales droites. Les ondes T symétriques de haut voltage se retrouvent dans l'ischémie aigue. Dans des conditions normales, le voltage normal de l'onde T ne dépasse pas 6 mm dans le plan frontal et 10 mm dans le plan horizontal.

L'onde U correspond à une petite déflexion qui suit l'onde T et qui a la même polarité que cette dernière. Elle peut se voir chez des adolescents, des vagotoniques ou les gens âgées.

Calcul de l'axe du coeur

On appelle axe électrique de l'onde P, du QRS et de l'onde T le vecteur résultant des forces créées au cours des processus respectifs de dépolarisation auriculaire et ventriculaire. Les valeurs normales de l'axe P dans plus de 90% des cas se situent entre $+30^{\circ}$ et $+70^{\circ}$, de l'axe QRS entre 0° et $+90^{\circ}$ et de l'axe T généralement entre 0° et $+70^{\circ}$. C'est l'axe du complexe QRS surtout dans le plan frontal qui est le souvent déterminé, car le plus utile du point de vue clinique.

L'axe normal du QRS se situe entre 0° et 90° , le plus souvent autour de $+60^{\circ}$. On parle d'axe droit s'il est $>+90^{\circ}$, gauche s'il se situe entre $>-30^{\circ}$. Il existe plusieurs méthodes pour calculer l'axe du cœur. On peut déterminer l'axe à partir des morphologies de I, II et III (axe normal: I positif, II positif et III positif ou négatif) ou par l'utilisation du diagramme hexaxial: la direction du courant suit les dérivations positives, s'éloigne des dérivations négatives et est à 90° par rapport à la dérivation avec un complexe QRS isoélectrique.

Exemple: si I positif, III et aVF négatifs, et II isoélectrique, axe QRS = -30° .