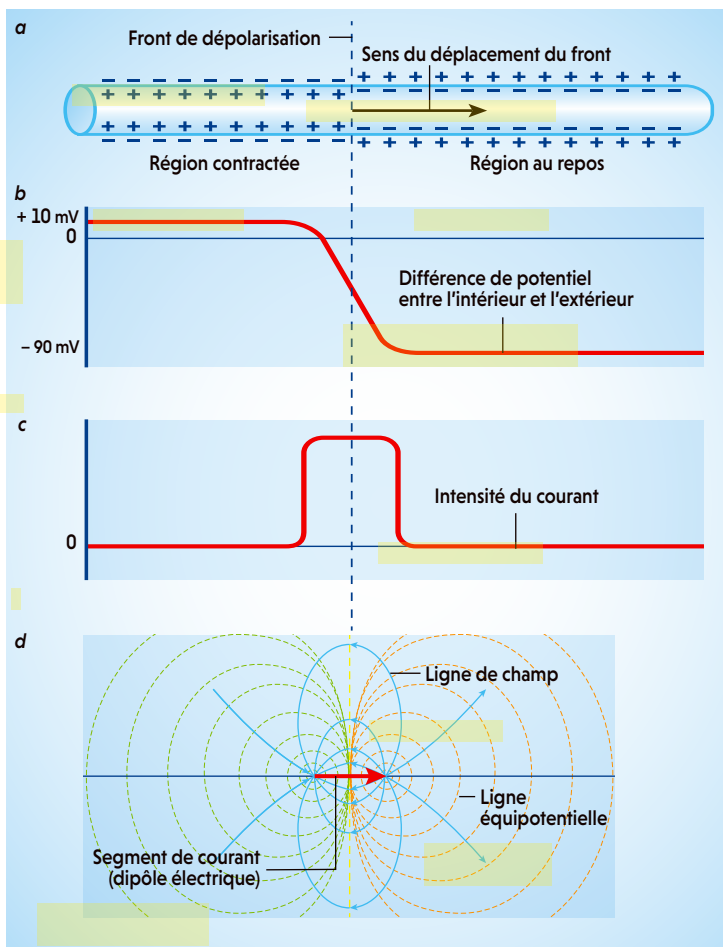


Dans un examen d'ECG, on mesure à l'aide d'électrodes posées à différents endroits sur la peau les différences de potentiel électrique créées par l'activité cardiaque.



LA DÉPOLARISATION D'UNE FIBRE MUSCULAIRE

L'intérieur d'une cellule musculaire au repos contient des ions négatifs tandis que l'extérieur est riche en ions positifs. La différence de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur est donc négative (environ -90 mV). À l'arrivée d'un signal, le « potentiel d'action », la fibre se « dépolairise » grâce à des échanges d'ions à travers sa membrane (a, b). La polarité s'inverse et la différence de potentiel devient positive (environ $+10$ mV). La région dépolairisée est alors en contraction. La région (millimétrique) de transition est le siège d'un courant d'intensité constante (c) ; ce « segment » de courant crée autour de lui un champ électrique analogue à celui d'un dipôle électrique (d).



le potentiel des tissus varie de 100 mV sur une très courte distance, moins de 5 millimètres typiquement. Il en résulte dans cette zone un champ électrique et, comme le milieu cellulaire est conducteur, un courant proportionnel à ce champ apparaît.

Pour simplifier, imaginons une fibre musculaire qui baigne dans le milieu extracellulaire. On a alors un courant en son sein uniquement sur une petite portion de sa longueur. Notons que ce « segment » de courant ne viole pas la loi de conservation de la charge électrique, qui reste valide grâce aux échanges de charges à travers la membrane cellulaire. Le

milieu extracellulaire étant lui-même conducteur, le segment de courant, qui avance le long de la fibre, induit à l'extérieur de celle-ci un champ électrique, donc des courants.

UN CHAMP ÉLECTRIQUE ANALOGUE À CELUI D'UN DIPÔLE ÉLECTRIQUE

Plus précisément, le segment de courant crée un champ non uniforme qui, à des distances très supérieures à la taille du segment, est analogue à celui d'un dipôle électrique, c'est-à-dire un couple de deux charges ponctuelles opposées et

séparées d'une certaine distance (voir l'encadré page 90). Même loin de la fibre, le potentiel électrique n'est pas uniforme. On peut donc déterminer l'activité électrique de la fibre en mesurant, à distance, les différences de potentiel qu'elle crée.

Cependant, un cœur n'est pas formé d'une seule fibre, mais d'une multitude de fibres. Et le cheminement du potentiel d'action dans l'organe est complexe, tout >

Les auteurs ont notamment publié :
En avant la physique !, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



> comme l'est le front de dépolarisation. Toujours est-il que la somme de tous les segments de courant présents à un instant donné, correspondant à la contraction de multiples fibres musculaires, constitue l'équivalent d'un dipôle électrique. L'amplitude et la direction de ce dipôle électrique équivalent vont beaucoup varier au cours du temps, à mesure que le potentiel d'action se propage dans le cœur et qu'il entraîne, successivement, la contraction des différentes parties de cet organe.

DÉTERMINER LE DIPÔLE ÉLECTRIQUE ÉQUIVALENT

De fait, le dipôle électrique équivalent (plus précisément son amplitude et sa direction) contient l'essentiel de l'information sur l'activité électrique du cœur. L'ECG est une méthode qui permet de le déterminer, et ainsi de diagnostiquer l'activité cardiaque. En pratique, l'ECG exploite une propriété des équipotentielles (régions où le potentiel prend la même valeur) d'un dipôle électrique: la différence de potentiel entre deux points quelconques mais pris à égale distance du dipôle est proportionnelle à la composante du dipôle parallèle à l'axe qui relie les deux points.

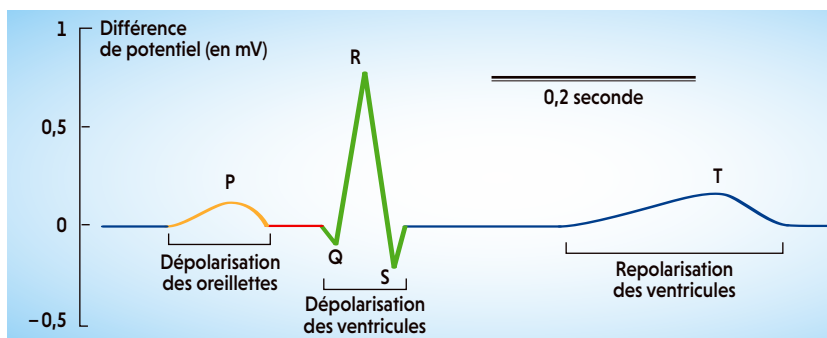
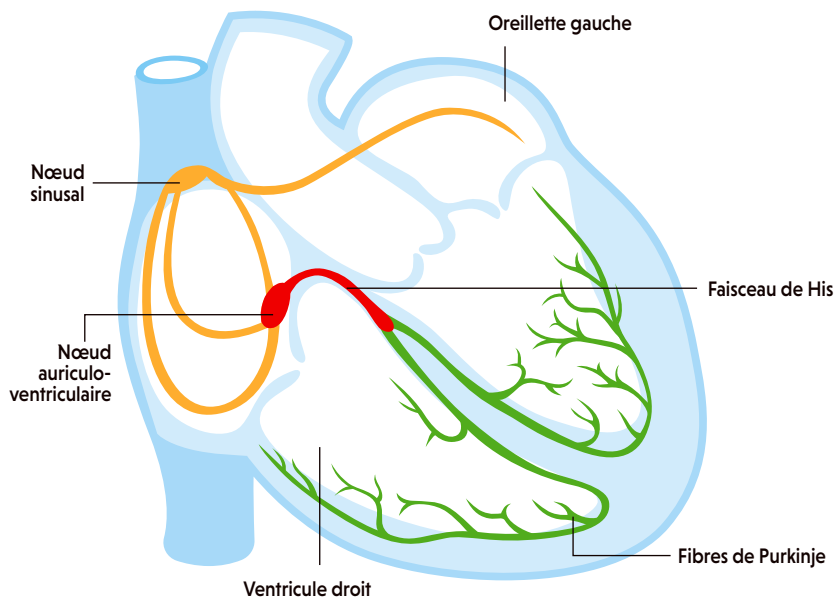
C'est une telle mesure que l'on fait, par exemple, avec les électrodes placées au niveau des poignets ou des chevilles. Elles sont suffisamment éloignées du cœur pour que la localisation exacte du dipôle électrique équivalent n'ait pas vraiment d'importance et elles sont bien, approximativement, à égale distance du cœur. Ainsi, la différence de potentiel entre les deux poignets donne accès à la composante du dipôle parallèle à l'axe reliant les deux épaules.

Un électrocardiogramme typique issu de cette mesure montrera, pour chaque battement du cœur, une succession d'ondes de formes caractéristiques (*voir l'encadré ci-contre*). Celles-ci traduisent la progression du front de dépolarisation dans le cœur et la contraction des parties successives (oreillettes, ventricules) qui s'ensuit, le cycle s'achevant avec une onde qui correspond à la repolarisation des ventricules.

En combinant la mesure de la différence de potentiel entre les deux poignets avec les mesures de tension électrique entre un poignet et une cheville, il est ainsi possible de déterminer la projection du dipôle électrique équivalent dans le plan frontal (le plan du torse), ce qui est utile pour le diagnostic. Par exemple, une anomalie de la direction moyenne du

DES CONTRACTIONS LISIBLES SUR L'ECG

Le signal nerveux qui entraîne un battement de cœur prend sa source dans le nœud sinusal. Après avoir dépolarisé et fait contracter les oreillettes, ce signal traverse le nœud auriculoventriculaire où il est très ralenti. Cela laisse au sang le temps de passer des oreillettes aux ventricules, qui se contractent à leur tour lorsque le signal reprend sa route dans le faisceau de His et atteint les réseaux de fibres de Purkinje. Ces diverses phases de dépolarisation (et de contraction) des muscles cardiaques se traduisent dans l'électrocardiogramme par des « ondes » notées P, Q, R, S et T.



dipôle équivalent lors de la dépolarisation des ventricules, direction qui définit l'«axe électrique du cœur», est en général liée à une anomalie de forme ou d'épaisseur des cavités ventriculaires.

Pour être complet et avoir une visualisation de l'activité électrique à trois dimensions, on dispose des électrodes sur le thorax, afin d'obtenir des informations relatives au plan horizontal (orthogonal à l'axe allant de la tête aux pieds). En revanche, comme ces électrodes sont plus proches du cœur, on n'a pas la simplicité d'interprétation en termes de dipôle équivalent. Il faut alors toute l'expertise et l'expérience du cardiologue pour interpréter correctement les signaux. ■

BIBLIOGRAPHIE

L.-J. Thoms et al., **Electrocardiography with a smartphone**, *The Physics Teacher*, vol. 57, pp. 586-589, 2019.

A. Dupre et al., **Basic ECG theory, recordings and interpretation**, *Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices* (dir. P. A. Iaizzo), pp. 191-201, Humana Press, 2005.