



CHAPITRE I ELECTROPHYSIOLOGIE CARDIAQUE

Dr. A. ABBOU

I. Introduction :

Comme la cellule nerveuse, la cellule cardiaque est polarisée au repos : si on place 2 microélectrodes l'une à la surface et l'autre à l'intérieur d'une fibre cardiaque, on enregistre une différence de potentiel transmembranaire (ddp).

Les variations de potentiel électrique enregistrées de part et d'autre de la membrane des cellules cardiaques aux différentes phases de la révolution cardiaque sont fonction de la différence de distribution des ions entre les milieux intra et extra cellulaire et des flux ioniques à travers la membrane cellulaire.

La contraction des fibres myocardiques fait suite à leur dépolarisation (les phénomènes électriques précèdent les phénomènes mécaniques).

D'un point de vue fonctionnel, il existe deux types de cellules cardiaques:

- a) Les cellules myocardiques proprement dites (cellules contractiles):
 - ce sont des fibres musculaires capables de répondre par une contraction lorsqu'elles sont stimulées (myocytes atriales ou ventriculaires).
 - elles n'ont pas d'activité automatique.
- b) Les cellules myocardiques spécialisées (cellules automatiques):
 - ce sont les cellules appartenant au tissu nodal.
 - sont douées d'activité automatique.
 - chargées de générer et de conduire les ondes de dépolarisation à travers des voies de conduction spécifiques permettant l'activation coordonnée des fibres musculaires cardiaques.

II. Potentiel membranaire de repos :

Les cellules cardiaques sont polarisées au repos : il est possible d'enregistrer un potentiel membranaire de repos entre l'intérieur de la cellule à polarité négative et l'extérieur à polarité positive (potentiel transmembranaire de repos), sa valeur est variable selon le type cellulaire (en millivolts) :

- fibre ventriculaire et cellule du système His purkinje : -90 mV .
- fibre atriale : - 90 mV.
- cellule du nœud sinusal et nœud atrio-ventriculaire : - 60 mV.

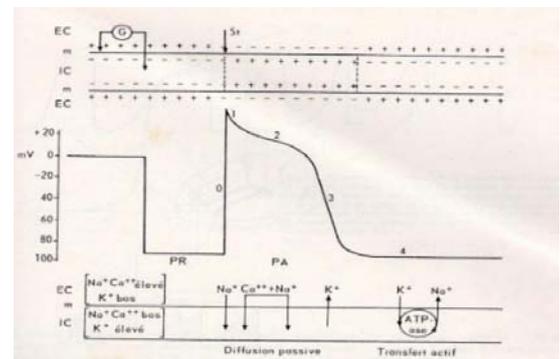
Ce potentiel membranaire de repos résulte de la répartition inégale des ions entre l'intérieur et l'extérieur de la membrane de la cellule myocardique qui est assimilée à une pile électrochimique.

Les concentrations ioniques retrouvées au repos sont :

- l'ion Na⁺ : est 10 fois plus concentré à l'extérieur de la cellule.
- l'ion K⁺ : est 30 fois plus concentré à l'intérieur.
- l'ion Ca⁺⁺ : est 100 -1000 fois plus concentré à l'extérieur.

Deux processus sont en jeu :

- Le premier lié à un transport passif : en effet, chaque ion est soumis à deux forces, l'une due au gradient de concentration tendant à faire sortir les ions K⁺ et entrer les ions Na⁺ et l'autre due au gradient électrique tendant à attirer les cations à l'intérieur de la cellule (l'intérieur de la cellule ayant une polarité négative).
- Le deuxième est lié à un transport actif : en rapport avec l'action de la pompe à sodium potassium qui expulse les ions Na⁺ hors de la cellule et récupère les ions K⁺ vers l'intérieur de la cellule permet de maintenir les différences de concentrations ioniques observées de part et d'autre de la membrane cellulaire.



Le potentiel membranaire de repos résulte de l'action conjointe de ces deux processus. Par ailleurs, la membrane des cellules cardiaques au repos est surtout perméable aux ions potassium (K⁺) et se comporte comme une pile à concentration au potassium.

III. Potentiel d'action :

L'application à la cellule cardiaque d'un stimulus d'intensité suffisante entraîne l'apparition d'un potentiel d'action (PA). Ce potentiel d'action traduit des variations du potentiel membranaire en fonction du temps. Ces variations sont dues à des courants ioniques transmembranaires passifs : mouvements des ions selon leurs gradients de concentrations à travers des canaux ioniques spécifiques à chacun d'entre eux.

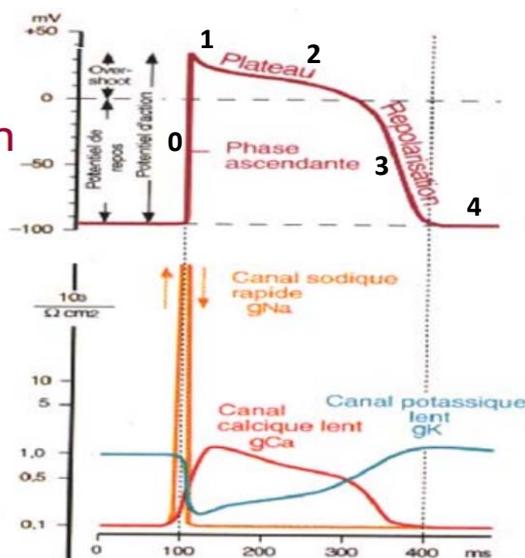
Il existe en effet différents types de canaux ioniques : **canal sodique, canal potassique et canal calcique.**

L'ouverture et la fermeture de ces canaux ioniques dépend du niveau du potentiel membranaire : ils sont dits **canaux voltage dépendant.**

Leur cinétique d'ouverture et de fermeture n'est pas la même. celle du canal sodique est **rapide** (canal sodique rapide), par contre celle du canal calcique est **lente** (canal calcique lent).

On note aussi une variabilité de la perméabilité membranaire (appelée **Conductance**) aux différents ions selon les différentes phases du potentiel d'action.

Le potentiel d'action



Les conductances

1. Déroulement du PA :

Il comprend plusieurs phases :

a) Phase 0 : phase de dépolarisation brusque :

Inverse la polarisation membranaire : l'intérieur de la cellule devient positif (+) et l'extérieur négatif (-). Cette phase est due à l'entrée massive d'ions Na^+ dans la cellule par le canal sodique rapide et selon son gradient de concentration.

b) Phase 1 : phase de repolarisation initiale :

Elle est brève et peu ample, due à la fermeture du canal sodique et l'entrée d'ions Cl^- chlorures.

c) Phase 2 : c'est la phase de dépolarisation maintenue (plateau de dépolarisation).

Elle maintient l'état de dépolarisation de la cellule, elle est due à l'entrée d'ions Ca^{++} par le canal calcique lent.

Les ions Ca^{++} entrés interviennent dans le couplage excitation-contraction.

Cette phase 2 avec son plateau ne s'observe que dans les fibres ventriculaires et celle du système his-purkinje. Elle est absente dans les cellules atriales ou celles du nœud sinusal et du nœud atrio-ventriculaire (NAV).

De plus cette phase 2 avec son plateau explique la plus grande durée du potentiel d'action des cellules cardiaques par rapport aux cellules nerveuses.

d) Phase 3 : la phase de repolarisation terminale.

Elle ramène le potentiel membranaire à sa valeur de repos, elle est due à l'inactivation du canal calcique et l'ouverture du canal potassique, permettant la sortie des ions K^+ selon leur gradient de concentration.

e) Phase 4 : c'est la phase de potentiel de repos ou diastole électrique.

Lors de cette phase, le potentiel membranaire de repos des cellules non automatiques (fibres atriales et ventriculaires) reste stable, par contre celui des cellules automatiques (cellules du tissu nodal) présente une dépolarisation lente spontanée et progressive (DDL : dépolarisation diastolique lente) à l'origine de leur activité automatique.

IV. Rétablissement du potentiel membranaire de repos : Transports actifs :

A chaque potentiel d'action, il y'a entrée d'ions Na^+ et Ca^{++} et sortie d'ions K^+ . Il existe parallèlement des mécanismes inverses qui restaurent les concentrations ioniques normales initiales intra et extra cellulaires, permettant ainsi à de nouveaux potentiels d'action (PA) d'avoir lieu.

Il s'agit là de mouvements ioniques actifs qui se font contre les gradients de concentrations ioniques et qui s'accompagnent d'une consommation d'énergie sous forme d'ATP. Ils sont sous la dépendance d'une pompe : c'est la pompe à Na-k, celle ci :

- expulse le sodium (Na) entré et récupère le potassium (K) sorti.
- elle consomme de l'énergie sous forme d'ATP sous l'action d'une enzyme membranaire : l'ATPase membranaire.
- cette pompe est active en présence de Mg (magnésium) : elle est dite magnésium-dépendante.
- son fonctionnement est régulé par les concentrations extracellulaires de K et intracellulaire de Na.

V. Différents types de cellules cardiaques :

Il existe deux types de cellules cardiaques en fonction de leurs caractéristiques électrophysiologiques:

1. Les cellules à réponse rapide :

Ce sont les cellules ventriculaire et les cellules du système His purkinje , caractérisées par :

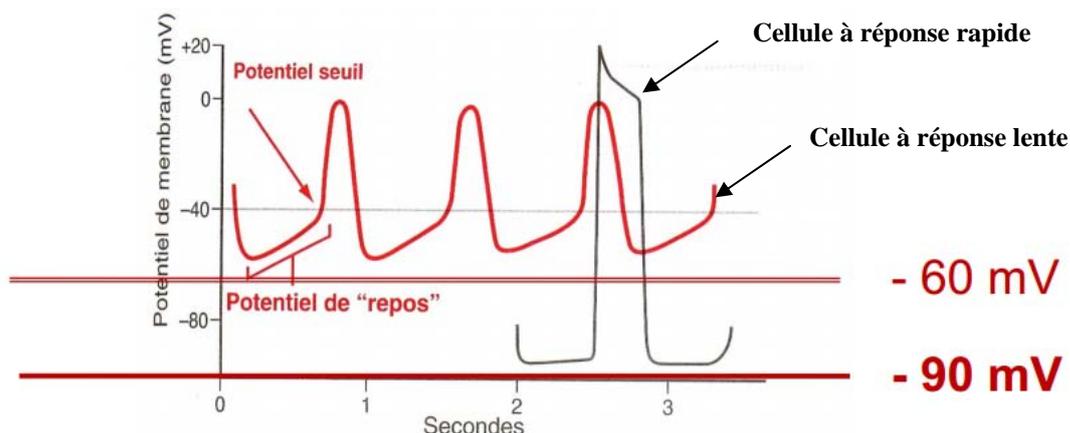
- un potentiel de repos égal à - 90 mV.
- une montée rapide de la phase 0.
- une grande amplitude du potentiel d'action (PA).
- avec présence du plateau de dépolarisation de la phase 2 (PA d'aspect rectangulaire)
- une vitesse de conduction du courant élevée (0,5 – 4 m/sec).

2. Les cellules à réponse lente :

Ce sont les cellules du nœud sinusal et du nœud atrio-ventriculaire, caractérisées par :

- un potentiel de repos de - 60 mV.
- une montée lente de la phase 0 qui n'est pas bien individualisée.
- une faible amplitude du potentiel d'action (PA).
- avec absence du plateau de la phase 2.
- une vitesse de conduction du courant lente (0,01-0,1m/sec).

Remarque : les cellules atriales ont toutes les caractéristiques des cellules à réponse rapide mais n'ont pas de plateau de phase 2 bien individualisé (PA d'aspect triangulaire).



VI. Propriétés de cellules cardiaques :

1. L'EXCITABILITE:

C'est la propriété de la cellule à répondre à un stimulus (physiologiquement électrique) par un potentiel d'action (PA).

a) Le seuil d'excitabilité diastolique:

C'est l'intensité du stimulus (courant) nécessaire et suffisante pour obtenir une réponse sous forme de potentiel d'action (PA).

Cette intensité du courant dépolarisant ramène le potentiel membranaire à une valeur seuil dite : **seuil de potentiel (SP)** appelée aussi **potentiel seuil** à partir de laquelle se déclenche un potentiel d'action.

Les cellules à réponse rapide ont un potentiel seuil (SP) situé à - 70 mV, les cellules à réponse lente ont un potentiel seuil (SP) situé à - 50 mV).

- Un stimulus entraînant une dépolarisation membranaire partielle n'atteignant pas le seuil de potentiel est dit : stimulus d'**intensité infraliminaire**.
- Le stimulus dépolarisant la membrane jusqu'au seuil de potentiel permettant d'avoir un potentiel d'action est dit : stimulus d'**intensité liminaire**.
- Le stimulus entraînant une dépolarisation membranaire dépassant le seuil de potentiel est dit : stimulus d'**intensité supraliminaire**.

b) Le cycle d'excitabilité : notion de périodes réfractaires :

L'excitabilité des cellules cardiaques est stable au cours de la diastole électrique entre deux potentiels d'action, mais elle varie le long du cycle du potentiel d'action(PA) :

- Période réfractaire absolue «PRA» : dure pendant la plus grande partie du potentiel d'action(PA), pendant cette phase, la cellule est inexcitable quelle que soit l'intensité du stimulus.

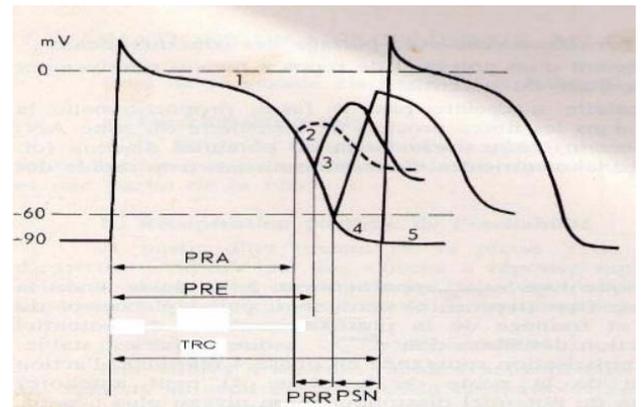
- Période réfractaire relative «PRR» : survient à la phase 3, entre la fin de la PRA et le retour au potentiel de repos, au cours de cette phase, des stimuli forts, d'intensité supraliminaires peuvent donner des potentiels d'action (PA), soit locaux non propagés, soit susceptibles d'être propagés mais dont l'amplitude est faible et la vitesse de conduction ralentie.

- Période réfractaire effective (période réfractaire efficace) «PRE» : la première réponse propagée définit la fin de la PRE.

- Période supernormale (période supranormale): PSN : située entre la fin de la PRR et le retour à une excitabilité membranaire diastolique normale, dans ce cas, des potentiels d'action (PA) peuvent être déclenchés par des stimuli d'intensité infra liminaire (elle constitue une période de vulnérabilité).

- Temps de récupération complète : TRC: représente le temps nécessaire à la cellule pour le retour à une excitabilité diastolique normale.

*remarque :la présence de la phase 2(plateau) du potentiel d'action au niveau des cellules cardiaques fait que leur période réfractaire est plus longue comparée aux cellules nerveuses et musculaires(muscle strié) empêchant ainsi leur téτανisation.



2. L'AUTOMATISME CARDIAQUE :

Les cellules cardiaques non automatiques ont un potentiel de repos stable.

Les cellules cardiaques automatiques (cellules du tissu nodal) se dépolarisent de façon spontanée et rythmique, leur potentiel membranaire de repos n'est pas stable : il présente une pente de dépolarisation diastolique lente spontanée (DDL).celle ci survient lors de la phase 4 (phase de diastole électrique) .

La dépolarisation due à la DDL permet au potentiel membranaire d'atteindre spontanément le seuil de potentiel (SP),seuil critique à partir duquel se déclenche un nouveau potentiel d'action (PA) qui pourra se propager par la suite.

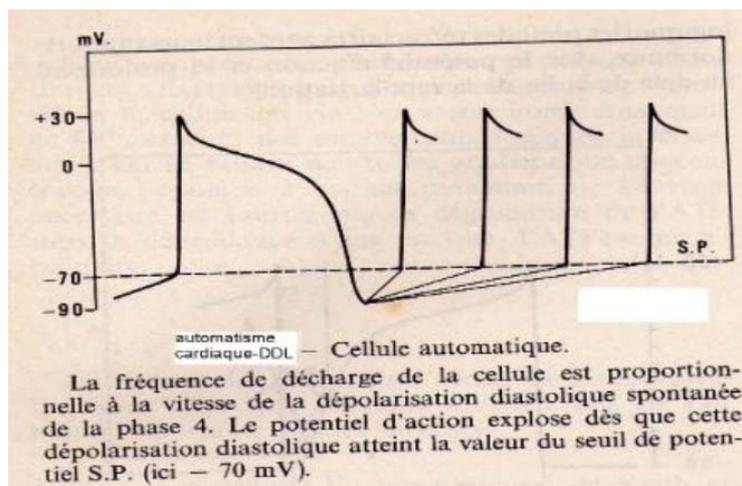
La DDL est en rapport avec la diminution progressive de la perméabilité membranaire aux ions K en présence d'un courant sodique entrant constant.

Plus la pente de la DDL est forte, plus le seuil de potentiel (SP) est atteint plus facilement,et plus la fréquence de décharge de la cellule cardiaque est accélérée.

A l'état normal :les cellules du nœud sinusal ont l'automatisme le plus rapide et prennent la commande du rythme cardiaque. Le nœud sinusal constitue le pace maker physiologique (pace maker principal).

Le nœud sinusal décharge les cellules automatiques sous jacentes (du nœud atrio-ventriculaire et du système His purkinje) avant que leur pente de dépolarisation diastolique spontanée propre n'ait atteint le seuil de potentiel (SP).

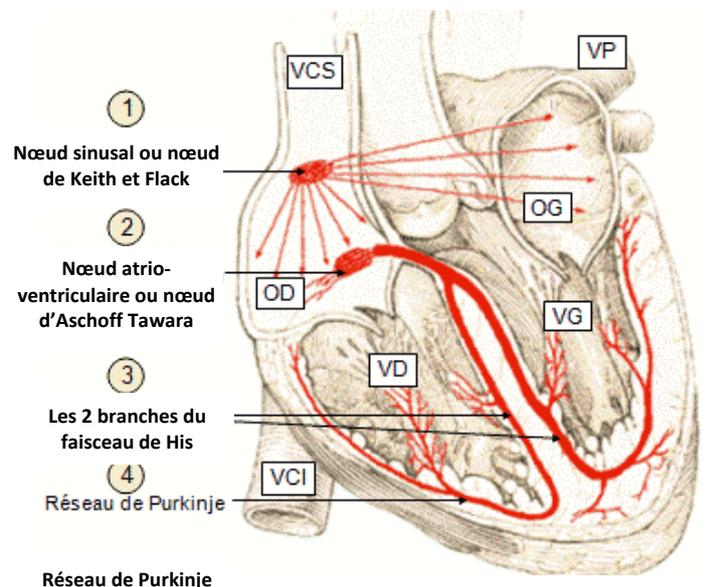
Ces centres automatiques sous jacentes représentent des pacemakers secondaires (centres de réserve) de fréquence de décharge plus lente à mesure qu'on s'éloigne du nœud sinusal vers le réseau de purkinje, normalement ils sont inhibés par les dépolarisations du nœud sinusal mais sont susceptibles de se réveiller lors de certaines situations pathologiques.



3. CONDUCTION CARDIAQUE :

a) Les voies de conduction :

Les potentiels d'action (PA) naissent du nœud sinusal, elles constituent un stimulus d'intensité suffisante et vont stimuler les cellules atriales et les dépolariser, la propagation de l'onde d'excitation se fait de proche en proche, elle gagne ensuite le nœud atrio-ventriculaire, puis le faisceau de His (cette voie Nodo-Hissienne « NAV + Faisceau de His » est la seule voie de transmission de l'influx des oreillettes aux ventricules), l'onde parcourt ensuite les 2 branches du faisceau de His, elle atteint le réseau de Purkinje et dépolarisent les cellules ventriculaires en progressant de l'endocarde vers l'épicarde.



b) La vitesse de conduction :

La vitesse de conduction dépend de plusieurs facteurs :

1- facteurs anatomiques : ce sont :

- le diamètre des fibres : les fibres de gros diamètre (exp fibres du réseau de Purkinje) ont une vitesse de conduction plus élevée que les fibres de diamètre plus petit (exp :fibres du myocarde atrial ou ventriculaire).

- type de jonction intercellulaire : la propagation du courant dépolarisant d'une cellule à une autre se fait par les disques intercalaires et les nexus (jonctions serrées) qui sont des zones de moindre résistance, les disques intercalaires sont abondants au niveau des cellules du système His-purkinje et du myocarde atriale et ventriculaire, ce qui facilite la conduction de l'onde de dépolarisation à ce niveau, par contre, ils sont plus rares dans les cellules du nœud sinusal et celles du nœud atrio-ventriculaire rendant la propagation de l'onde de dépolarisation plus difficile à ce niveau.

2- facteurs électrophysiologiques :

La vitesse de conduction de l'onde de dépolarisation dépend essentiellement de la vitesse d'ascension de la phase 0 du potentiel d'action (PA) et de l'amplitude de celui-ci. Ces deux derniers sont fonction du niveau du potentiel membranaire de repos. Plus le potentiel membranaire de repos est élevé (plus négatif), plus la vitesse d'ascension de la phase 0 sera rapide et l'amplitude du PA élevée, et plus la vitesse de conduction est rapide .ainsi :

- les cellules du système His Purkinje ont un potentiel de repos égal à - 90 mV, avec une vitesse d'ascension de la phase 0 rapide et conduisent rapidement.
- les cellules du nœud atrio-ventriculaire (NAV) qui ont un potentiel de repos de -60 mV, sont partiellement dépolarisées et ont une vitesse d'ascension de la phase 0 lente et aussi une conduction lente.

Donc, le NAV joue le rôle de filtre, c'est la principale source du retard de la conduction atrio-ventriculire (engendrant un décalage entre la contraction atriale et ventriculaire).

VI-INFLUENCE DU SYSTEME NERVEUX AUTONOME :

Le cœur possède une innervation neurovégétative sympathique et parasympathique dont le rôle est l'adaptation de la fonction cardiaque à la demande variable de l'organisme. Les nerfs parasympathiques innervent le nœud sinusal, le nœud atrio-ventriculaire et les oreillettes. Les nerfs sympathiques innervent toutes les régions du cœur et principalement le myocarde.

Leur action s'exerce par l'intermédiaire de neurotransmetteurs ; à savoir l'acétylcholine pour le système parasympathique et la noradrénaline pour le sympathique. Ces deux neurotransmetteurs se fixent sur des récepteurs spécifiques de la membrane cellulaire : cholinergiques pour l'acétylcholine et adrénergique pour l'adrénalines.

Les effets observés du contrôle :

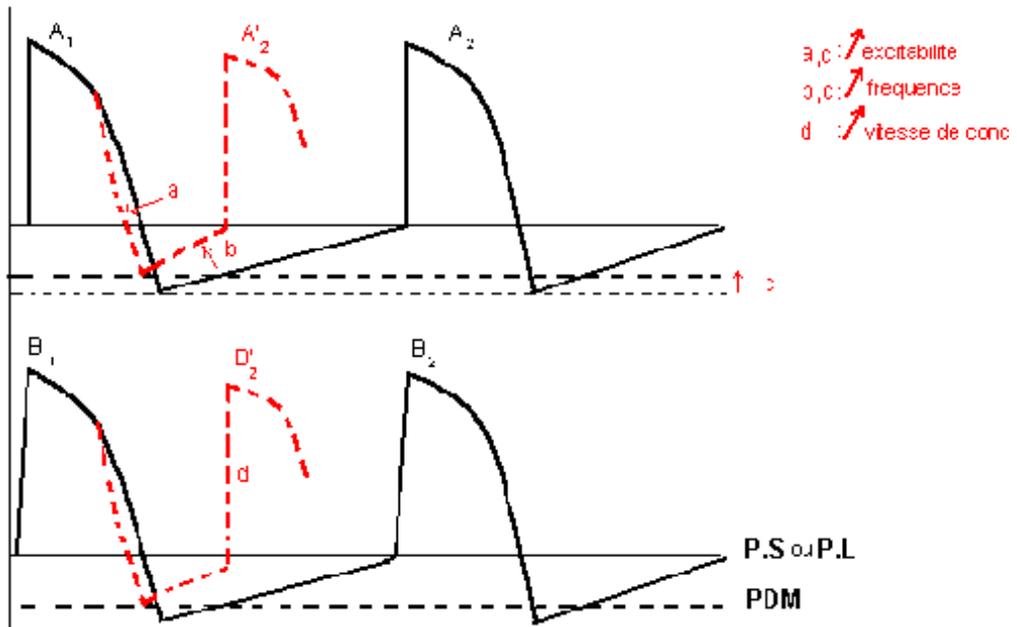
Les branches efférentes du système nerveux autonome (SNA) ont des effets antagonistes :

La stimulation sympathique :

- augmente la fréquence cardiaque >> effet **Chronotrope** positif.
- augmente la vitesse de conduction >> effet **Dromotrope** positif.
- augmente l'excitabilité cellulaire >> effet **Bathmotrope** positif.
- augmente la contractilité myocardique >> effet **Inotrope** positif.

La stimulation parasympathique engendre principalement un effet chronotrope négatif avec une diminution de la conductibilité (effet dromotrope négatif).

Système sympathique



Système parasympathique

