Potentiel d'action cardiaque version ttr

Salut l'équipe ! Aujourd'hui, on se retrouve ensemble pour un cours qui est en version TTR. Il vous manque une partie sur les ECG. Ne vous inquiétez pas, elle sera mise à jour dans le semestre.
C'est un cours très sympa qui vous attend ! Un conseil : ne confondez pas les deux types de cellules (nodales vs cardiomyocytes).
Bon courage et, si vous avez des questions, go forum !

Sommaire

I - Automatisme cardiaque et cellules nodales
1. Les cellules nodales
2. Propriétés des cellules nodales

II - Cardiomyocytes
1. Propriétés des cardiomyocytes
2. Squelette fibreux du cœur

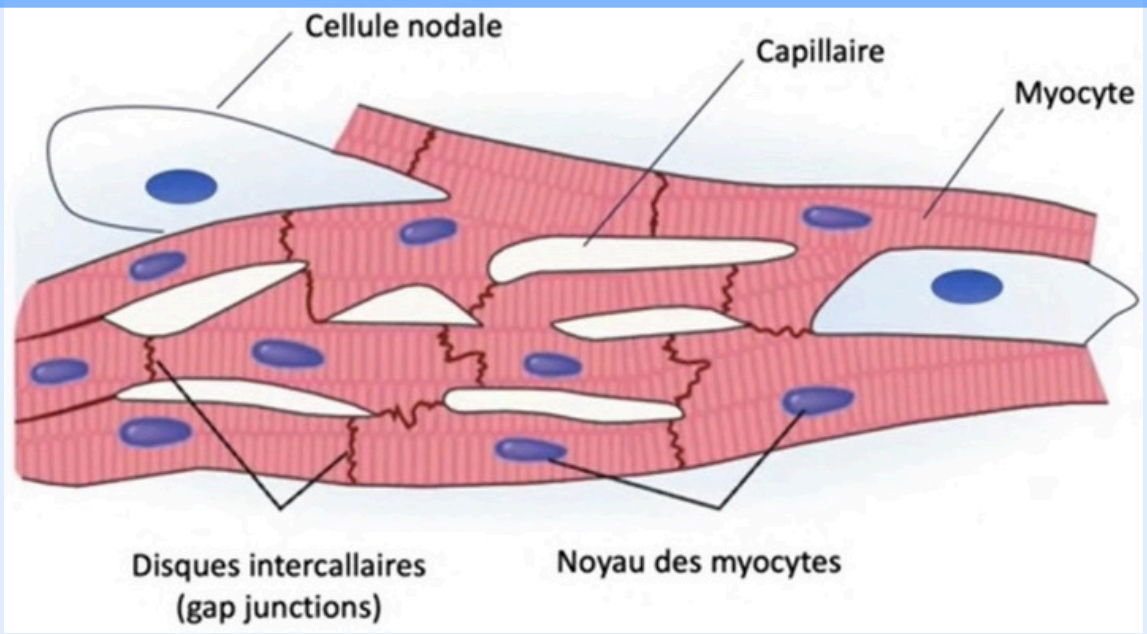
III - Canaux ioniques
1. Courants ioniques de la cellule nodale
2. Courants ioniques des cardiomyocytes
3. Canaux sodiques, calciques et potassique
4. Modification de la perméabilité des canaux sodiques et potassiques
5. Potentiel de repos et oxygénation du myocarde..

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

I - Automatisme cardiaque et cellules nodales

Le cœur est doué d'automatisme. Cet automatisme est permis grâce à l'action de cellules spéciales, les cellules nodales. On dit que ce sont des cellules Pace Maker+++.
Le muscle cardiaque se contracte de manière rythmique, selon un cycle divisé en :
- Systole (contraction du cœur)
- Diastole (relaxation du cœur)

Lors de la systole, toutes les fibres musculaires se contractent+++. Cette propriété découle de la structure et de la nature du tissu cardiaque.
La nature du tissu cardiaque rend possible sa transplantation+++.



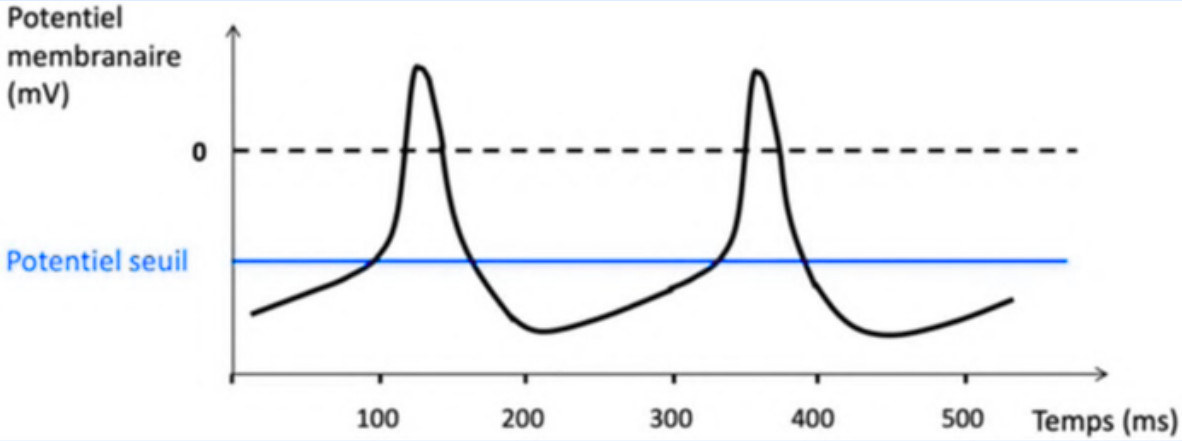
Vous avez ici un schéma de la structure histologique du cœur.

On voit :
- Des cellules nodales qui sont disposés en réseau ou sous forme de petits nœuds.
- Un réseau de cellules musculaires, appelées cardiomyocytes+++, qui sont reliés entre eux par des disques intercalaires (gap junctions). Ces disques sont des jonctions perméables qui permettent la conduction de l'influx électrique d'un myocyte à un autre, il y a une continuité électrique entre les cellules+++.
- En bleu sont matérialisés les noyaux cellulaires.
- On voit aussi des capillaires sanguins qui irriguent abondamment le tissu cardiaque.

A – Les cellules nodales

Pace Maker : les cellules nodales possèdent des propriétés de dépolarisation spontanée. En effet, elles possèdent à la surface de leur membrane des canaux ioniques pouvant s'ouvrir spontanément selon un cycle bien régulier, permettant de générer des influx électriques et donc un rythme.
Cellules excitables : la dépolarisation spontanée permet d'atteindre un certain seuil de potentiel membranaire, lorsque ce seuil est atteint la cellule nodale génère un potentiel d'action+++.

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.



Si on enregistre les variations de potentiel spontanés des cellules nodales en fonction du temps, voici ce que l'on trouve. Sur l'axe vertical on voit évoluer le potentiel membranaire (mV), et sur l'axe horizontal le temps (ms). Vous voyez que le potentiel de la cellule nodale évolue en permanence vers le potentiel seuil, lorsqu'elle l'atteint, un potentiel d'action se déclenche. Puis, lorsque le potentiel d'action se termine et qu'on repasse sous le potentiel seul, la phase de dépolarisation spontanée reprend, et ainsi de suite toute votre vie.

B – Propriétés des cellules nodales

1ère propriété : La cellule nodale possède un rythme et une fréquence.

- Rythme : succession de modifications électriques produites par l'ouverture spontanée de canaux ioniques
Dépolarisation lente potentiel d'action dépolarisation lente…

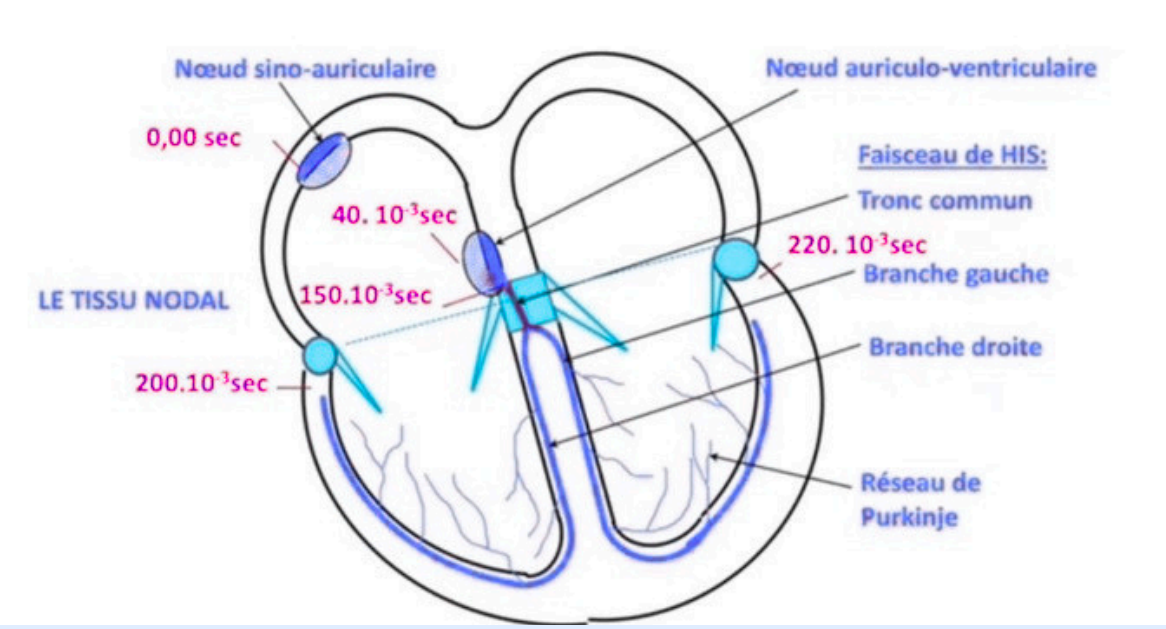
- Fréquence : nombre de modifications électriques identiques par unité de temps.
Faites bien la distinction entre rythme et fréquence ! Fréquence = unité de temps.

2ème propriété : la vitesse de propagation de l'influx électrique dans le tissu nodal est variable.

La conduction est plus rapide dans les oreillettes et les ventricules que dans les cardiomyocytes :
- Durée du PA dans les cardiomyocytes = 150 ms
- Durée de conduction dans les oreillettes = 40 ms
- Durée de conduction dans les ventricules = 50 à 70 ms

A chaque fois que le tissu nodal se dépolarise, l'ensemble des cardiomyocytes se dépolarisent également.

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.



Trajet de l'influx électrique dans le cœur+++ :

- **Naissance de l'influx** : il est généré au niveau du nœud sino-auriculaire (SA), situé dans la paroi de l'oreillette droite.
- **Propagation auriculaire** : l'influx se diffuse dans les oreillettes. La dépolarisation des deux oreillettes est complétée en environ 40 ms, ce qui permet leur contraction simultanée.
- **Nœud auriculo-ventriculaire (AV)** : situé dans le septum interauriculaire, à la jonction oreillettes–ventricules. Ici, la conduction est volontairement ralentie : l'influx met environ 150 ms pour le traverser. Ce délai empêche une contraction simultanée des oreillettes et des ventricules.
- Comme la durée du PA des cardiomyocytes auriculaires est également d'environ 150 ms, les oreillettes ont le temps d'achever leur contraction avant que les ventricules ne soient stimulés.
- **Faisceau de His** : depuis le nœud AV, l'influx gagne le faisceau de His, situé dans le septum interventriculaire. Celui-ci se divise en une branche droite (vers le ventricule droit) et une branche gauche (vers le ventricule gauche).
- **Réseau de Purkinje** : ces branches se ramifient en un réseau de fibres fines appelé fibres de Purkinje, qui assurent une distribution très rapide de l'influx à l'ensemble du myocarde ventriculaire, permettant une contraction synchrone et efficace des deux ventricules.

3ème propriété : Les cellules nodales se dépolarisent spontanément à une fréquence variable en fonction de leur emplacement :

Les différents nœuds et le réseau de Purkinje contiennent leurs propres cellules nodales qui se dépolarisent :
- 80 fois par minute au niveau du nœud sino-auriculaire
- 50 fois par minute au niveau du nœud auriculo-ventriculaire
- 20 fois par minute au niveau du réseau de Purkinje

Ces cellules permettent une chose : si la conduction du 1er influx généré dans le nœud sinoauriculaire est interrompu, l'automatisme cardiaque est assuré, mais à une fréquence inférieure+++

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

Récap des 3 propriétés des cellules nodales :
- Elles possèdent un rythme et une fréquence
- La vitesse de propagation de l'influx dans le tissu nodal est variable
- Elles se dépolarisent à une fréquence variable en fonction de leur emplacement

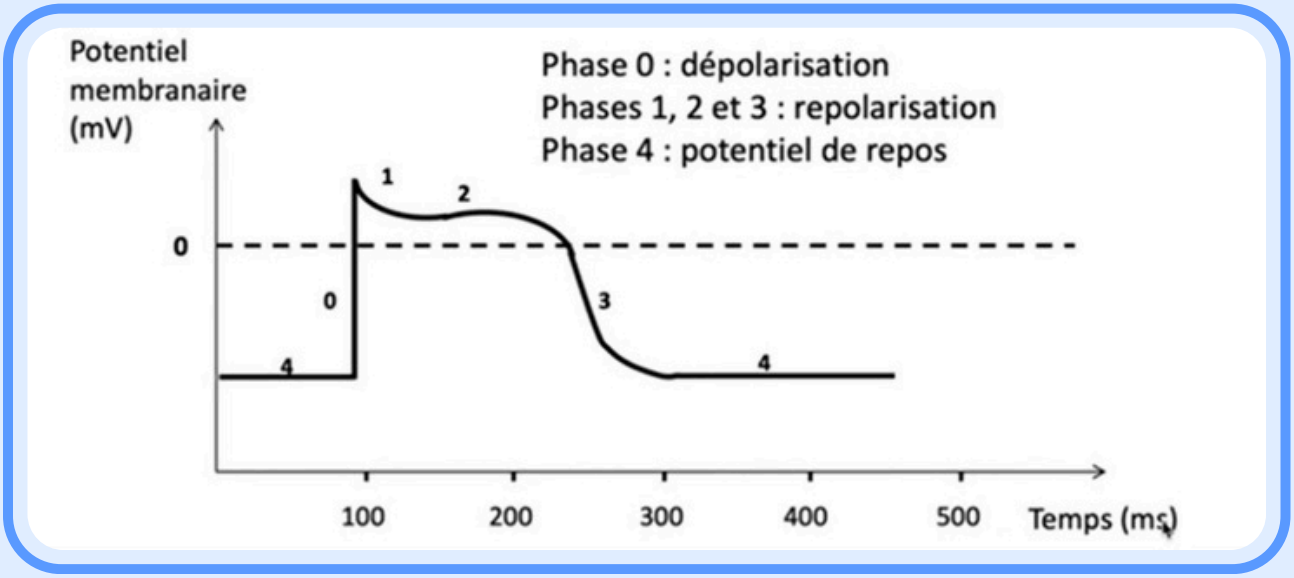
Petite conclusion du prof :
- L'automatisme cardiaque est lié à la dépolarisation spontanée des cellules nodales qui émettent des potentiels d'action.
- Cette propriété électrique aboutit à la contraction des oreillettes puis des ventricules.
A chaque fois dans les oreillettes et ventricules, l'ensemble des cardiomyocytes se contractent simultanément

II – Cardiomyocytes

A – Propriétés des cardiomyocytes

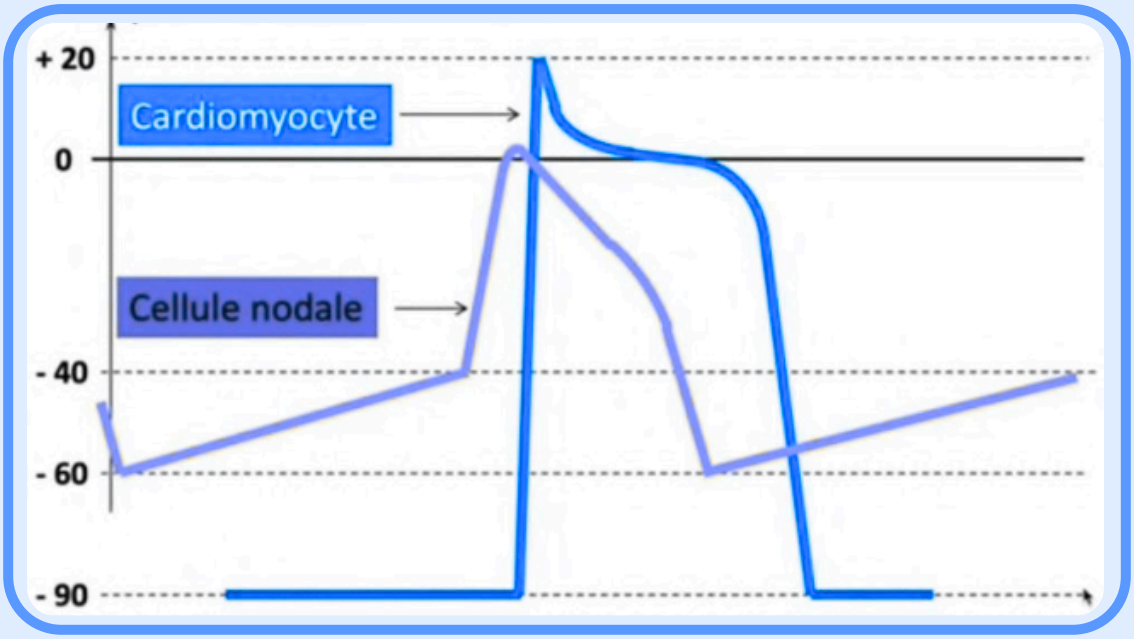
Les cardiomyocytes (cellule contractile) possèdent également leurs propres propriétés électriques.

1ère propriété : le cardiomyocyte est une cellule excitable :



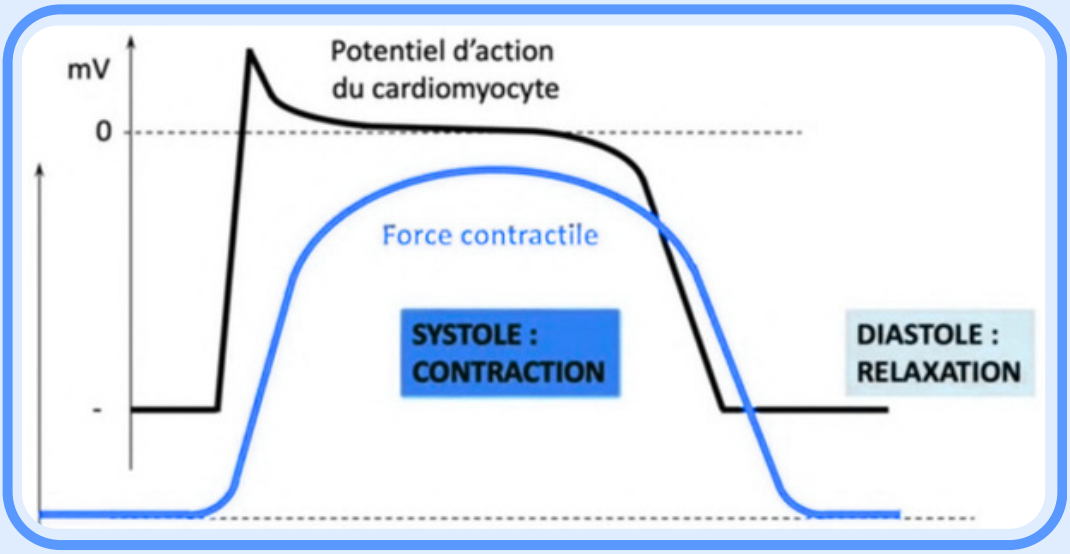
Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

Le cardiomyocyte est une cellule dite excitable, elle se dépolarise rapidement sous l'effet d'une impulsion extérieure (celle du tissu nodal si vous avez bien suivi). Ci-dessous est représenté un schéma de leur potentiel d'action et de leurs différentes phases en fonction du temps.
Le potentiel d'action du cardiomyocyte est divisé en 5 phases :
- Phase 0 : Dépolarisation rapide
- Phase 1-2-3 : Repolarisation
- Phase 4 : Potentiel de repos



Ce sont les cellules nodales qui transmettent le courant osmotique aux cardiomyocytes et qui les dépolarisent. Voici schématisé les potentiels de repos du cardiomyocyte et de la cellule nodale, ainsi que le potentiel seuil au niveau duquel les cellules nodales déclenchent un potentiel d'action.

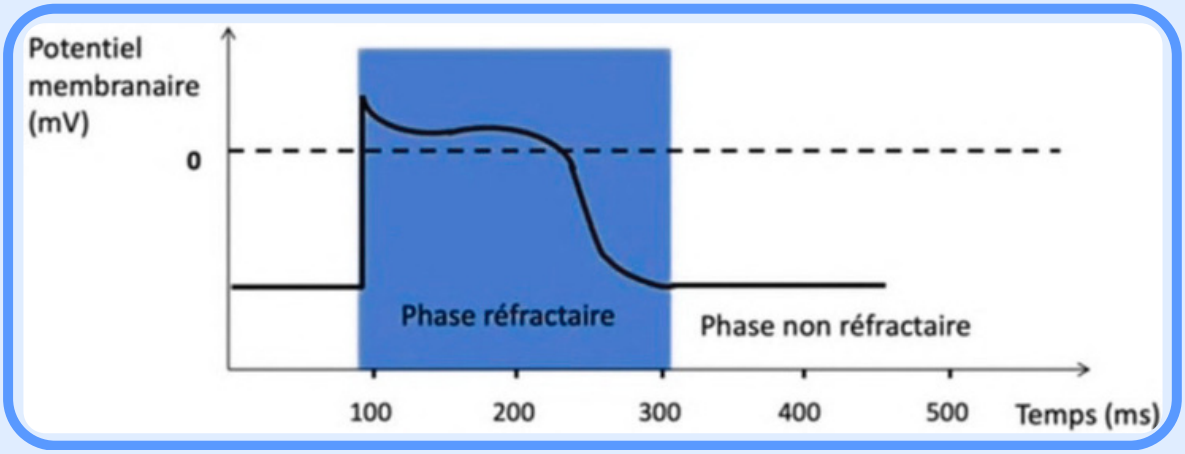
2ème propriété : les cardiomyocytes sont des cellules qui ont une force mécanique, qui se contractent.



Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

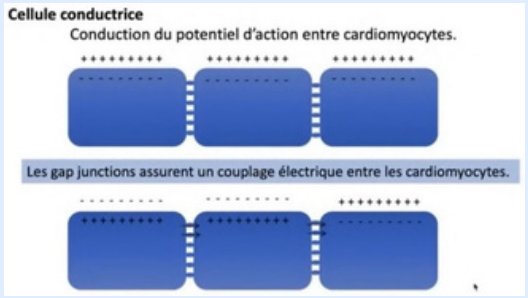
Sur ce schéma, on a superposé le potentiel d'action du cardiomyocyte (en noir) et le développement de sa force contractile (en violet) pendant la systole. On voit bien que la force contractile suit de près le potentiel d'action du cardiomyocyte. Le léger décalage est dû à un délai entre la contraction et le signal électrique.

3ème propriété : le cardiomyocyte est une cellule réfractaire :



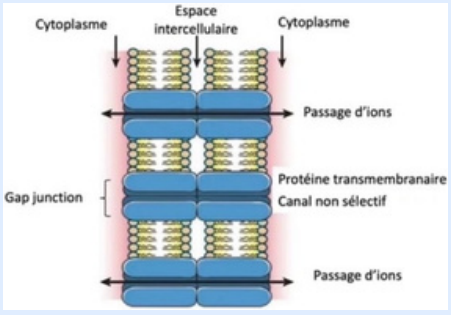
Contrairement à d'autres cellules musculaires, les cardiomyocytes possèdent une période réfractaire : un nouveau potentiel d'action survenant trop tôt ne déclenche pas de contraction. Pendant la dépolarisation rapide et la repolarisation, ils sont insensibles à tout signal. Cela oblige le cœur à se relâcher après chaque contraction, rendant la tétanisation impossible. Si un potentiel d'action arrive pendant cette phase réfractaire, il n'y aura pas de dépolarisation. Ici, si un potentiel d'action arrive alors que l'on se trouve dans la zone orange, on n'aura pas encore de dépolarisation ! On doit attendre la fin de la phase réfractaire avant d'être prêt pour un autre cycle dépolarisation/repolarisation.

4eme propriété : les cardiomyocytes sont des cellules conductrices :



Les cardiomyocytes sont reliés entre eux par des gap-junctions (jonctions communicantes)
assurant un couplage électrique entre eux et explique aussi que le courant osmotique gagne l'ensemble des cellules de manière très rapide.

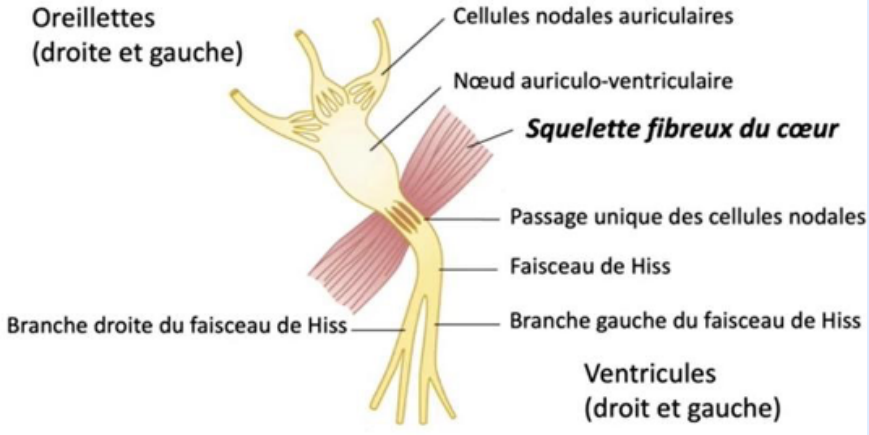
Gap junctions permettent un courant intracellulaire continu+++. On le voit bien ici, les gap junction relient le cytoplasme d'un cardiomyocyte avec le cytoplasme d'un autre. Le courant ne passe pas par l'espace intercellulaire mais passe de cytoplasme en cytoplasme donc courant intracellulaire continu !



Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

B - Squelette fibreux du cœur

Les cardiomyocytes sont fixés sur un squelette fibreux, séparant les cardiomyocytes des oreillettes et des ventricules. Il a différents rôles :
-Rôle mécanique : il permet aux valves auriculo-ventriculaires d'être ancrés
Rôle électrique : isolant électrique, qui fait qu'il n'y a pas de continuité électrique entre les cardiomyocytes des oreillettes et des ventricules+++. En effet, il n'y a pas de cellules qui, par leur gap junctions, franchissent le squelette fibreux du cœur. L'influx passe par les cellules nodales, comme vu plus haut.



Voici schématiquement le tissu nodal avec le squelette fibreux du cœur. Le seul élément de transmission des courants osmotiques entre les oreillettes et les ventricules c'est le faisceau de His dans son tronc commun. Ainsi, il va y avoir contraction simultanée des oreillettes PUIS des ventricules assurant le couplage entre la circulation pulmonaire et systémique (avec un débit identique au niveau des 2 circulations +++).

La systole auriculaire (=des oreillettes) précède ainsi la systole ventriculaire, le remplissage des ventricules est donc optimal.

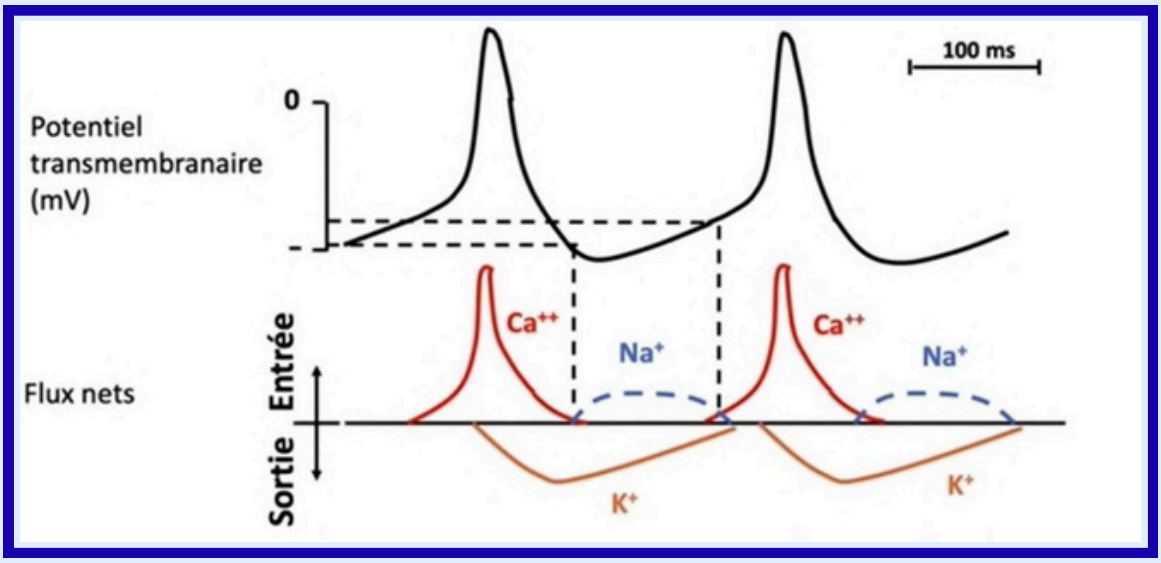
Récap des 4 propriétés de cardiomyocytes :
- Excitables (Dépolarisation rapide sous impulsion extérieure)
- Contractiles (Force mécanique)
- Réfractaires (PAS de tétanisation du myocarde)
- Connectées entre elles sur le plan électrique et mécanique (gap junctions)

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

III – Canaux ioniques

Nous avons détaillé les propriétés des cellules nodales et des cardiomyocytes. Nous allons maintenant voir ce qui est à l'origine de leurs propriétés électriques.
Le potentiel d'action du cardiomyocyte et de la cellule nodale est sous tendu par la présence de canaux ioniques qui sont des cibles régulatoires et thérapeutiques.

A- Courants ioniques de la cellule nodale



On voit en haut (en noir) l'évolution du potentiel transmembranaire de la cellule nodale et en bas les flux ioniques correspondant à cette évolution.

1. Dépolarisation rapide : Lorsque le potentiel seuil est atteint, commence la phase de dépolarisation rapide qui est expliquée par un flux entrant de calcium Ca2+ (en rouge).
2. Repolarisation : La repolarisation de la cellule (retour à la phase de repos sous le potentiel seuil) est expliquée par un flux sortant de potassium K+ (en orange) et l'arrêt du flux de calcium Ca2+.
3. Dépolarisation spontanée : La dépolarisation spontanée jusqu'au potentiel seuil est liée à un flux entrant de sodium Na+ (en bleu).

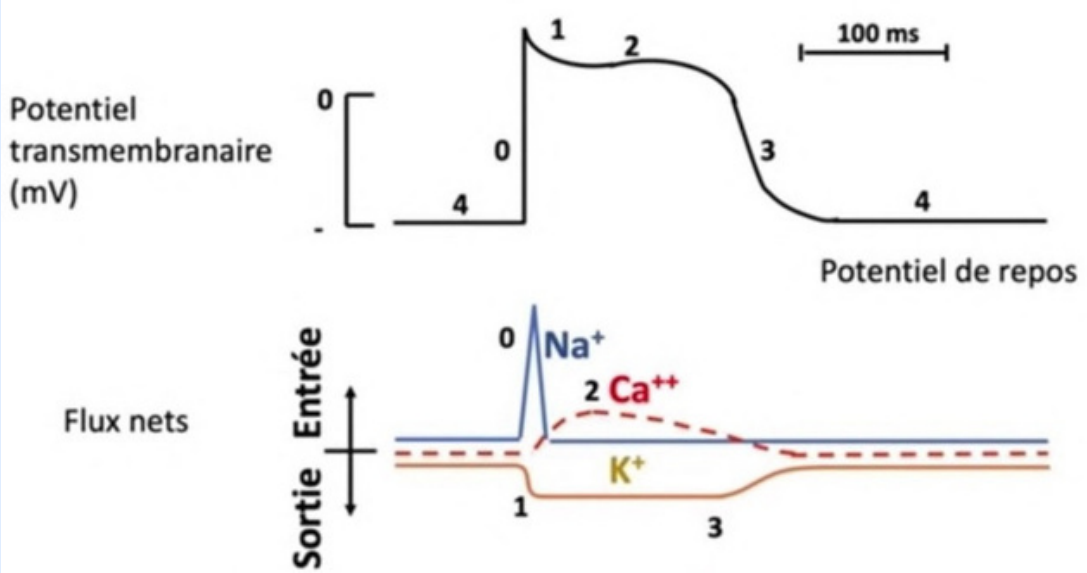
Ce schéma se reproduit de manière séquentielle pour produire un rythme.

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

Explication dépolarisation/repolarisation

- Dépolarisation : c'est quand la membrane d'une cellule (nerveuse, musculaire, cardiaque…) perd sa polarité électrique normale.
- Normalement, le feuillet interne de la membrane de la cellule est chargé négativement (voir cours potentiel de repos) par rapport à l'extérieur. Lors de la dépolarisation, des ions positifs (comme Nat ou Cat) entrent dans la cellule → l'intérieur devient moins négatif (et peut même devenir positif).
- Repolarisation : c'est le retour à l'état de repos après la dépolarisation.
- Cela se fait surtout par la sortie d'ions positifs (K*) vers l'extérieur, ce qui redonne à l'intérieur de la cellule sa négativité de base.
- C'est ce phénomène d'inversion de polarité des feuillets qui est appelé potentiel d'action.

B – Courants ioniques des cardiomyocytes



On voit en haut (en noir) l'évolution du potentiel transmembranaire du cardiomyocyte et en bas les flux ioniques correspondant à cette évolution.

1. Phase 0, dépolarisation : liée à un flux entrant de sodium Nat (en bleu)
2. Phase 1,2,3, repolarisation :

   Phase 1 : Flux sortant de potassium K+ (en orange) maintenu jusqu'à la phase 3
   Phase 2 : Phase de plateau liée à un flux entrant de calcium Ca2+ (en rouge) qui vient contrarier l'effet du flux entrant de potassium K+ (en orange), c'est pour ça qu'on a une phase de plateau, on a des charges positives qui rentrent et qui sortent
   Phase 3 : Flux potassique K+ (en orange) sortant, fin de l'entrée de calcium Ca2+ (en rouge)

3 - Phase 4 : retour du potentiel de repos, en attente de l'excitation par les cellules nodales.

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

C – Canaux sodiques, calciques et potassiques

Canaux sodiques

Cardiomyocytes	Cellules nodales
- Canaux voltage dépendant - Responsable de la phase 0 du potentiel d'action des cardiomyocytes - Ce sont les mêmes que ceux responsables du potentiel d'action neuronal dans les axones	- Canaux de type F (funny)+++ qui s'ouvrent spontanément - Responsables de la phase de dépolarisation spontanée - Leur perméabilité est diminuée par l'ivabradine et augmentée par l'adrénaline

Canaux potassiques

Cardiomyocytes	Cellules nodales
- Plusieurs types qui interviennent dans les phases 1,2 et 3 du potentiel d'action	- Interviennent dans la phase de dépolarisation spontanée - Leur perméabilité est augmentée par l'acétylcholine

Canaux calciques

Cardiomyocytes	Cellules nodales
- Canaux voltage dépendants de type L+++ *(pour long lasting, temps d'ouverture long)* - Responsable de la phase 2 du potentiel d'action des cardiomyocytes - L'afflux de calcium dans les cardiomyocytes augmente leur force de contractilité mécanique - Leur perméabilité est augmentée par l'adrénaline	- Canaux calciques de type L+++, responsables de la dépolarisation rapide

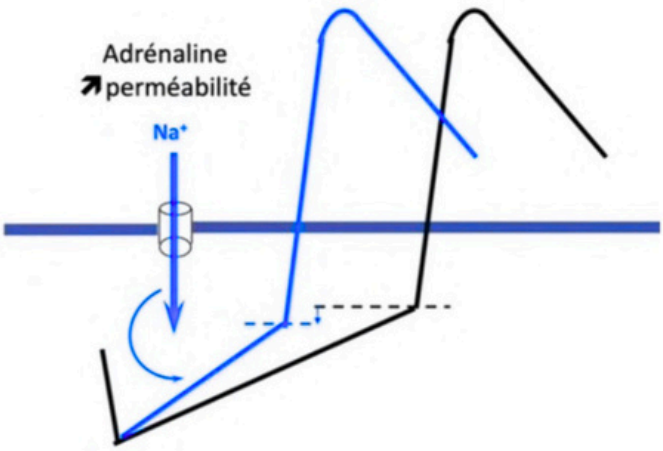
Il existe des molécules qui inhibent ces canaux calciques de type L. Ces inhibiteurs permettent de diminuer la force contractile du cœur et de ralentir la fréquence cardiaque.

Récap des types de canaux :
Canaux sodiques des cellules nodales = Type F
Canaux calciques des 2 cellules = Type L

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

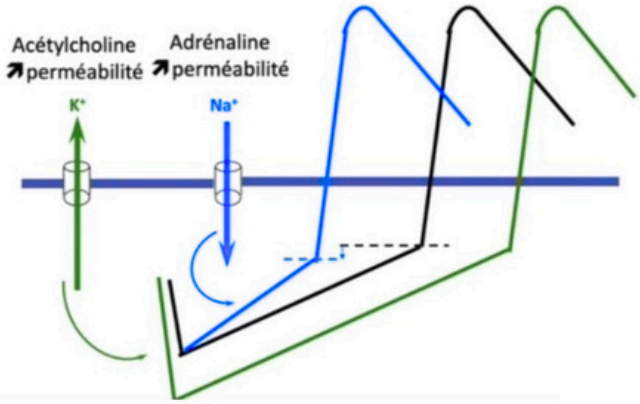
D - Modification de la perméabilité des canaux sodiques et potassiques

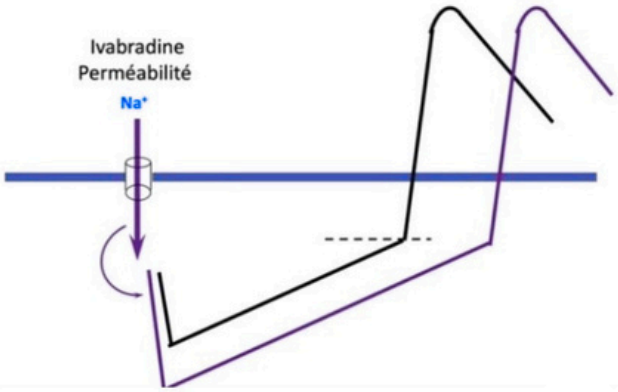
Dans ces schémas, la courbe noire représente la situation normale (sans action d'un médiateur ou d'un médicament). Les autres courbes colorées montrent l'effet d'une substance : l'adrénaline (rouge), l'acétylcholine (vert) et l'ivabradine (violet). Les lignes pleines correspondent à l'évolution réelle du potentiel d'action dans chaque condition, tandis que les lignes pointillées indiquent la position du seuil d'excitation et permettent de visualiser le moment où il est atteint.



L'adrénaline augmente la perméabilité des canaux sodiques de type F des cellules nodales, ce qui favorise une entrée plus rapide de ces ions. Cette action accélère la pente de dépolarisation spontanée, permettant d'atteindre plus vite le seuil d'excitation et de déclencher un potentiel d'action plus précocement. Ainsi, la fréquence de génération des potentiels d'action augmente, ce qui se traduit par une élévation de la fréquence cardiaque.

À l'inverse, l'acétylcholine augmente la perméabilité au potassium (K^+), ce qui favorise la sortie des ions positifs et ralentit la dépolarisation : le seuil est atteint plus tardivement, ce qui diminue la fréquence des potentiels d'action et donc la fréquence cardiaque.





Ce schéma montre l'effet de l'ivabradine sur le potentiel d'action cardiaque au niveau des canaux sodiques de type F. L'ivabradine agit en réduisant la perméabilité au sodium (Na^+) au niveau du courant pacemaker, ce qui ralentit la pente de dépolarisation spontanée. Par conséquent, le seuil est atteint plus tardivement, ce qui espace les potentiels d'action et entraîne une diminution de la fréquence cardiaque.

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

Tableau récap des molécules modulatrices

Molécule	Effet
Adrénaline	- Augmentation de la perméabilité des canaux sodiques de type F - Augmentation de la fréquence cardiaque
Acétylcholine	- Augmentation de la perméabilité des canaux potassiques - Diminution de la fréquence cardiaque
Ivabradine	- Diminution de la perméabilité des canaux sodiques de type F - Diminution de la fréquence cardiaque

E – Potentiel de repos et oxygénation du myocarde

Définition infarctus : arrêt de la circulation sanguine au niveau d'un territoire myocardique aboutissant à une nécrose cellulaire -> aspect « infarci » du myocarde car ce territoire prend une texture dense.
Lors d'un infarctus, les cellules sont en hypoxie (manque d'oxygène). Ce manque d'O2 dans les cellules va entraîner une baisse de la production d'ATP (voir vos cours de bioch) et donc va empêcher les pompes à sodium, notamment, de bien fonctionner.
Dans cette situation, le potentiel de repos est modifié, car la pompe à sodium maintient ce potentiel (voir le cours sur le potentiel de repos). La dépolarisation des cellules nodales et des cardiomyocytes dans le territoire infarci devient anarchique et on peut obtenir ce qu'on appelle une fibrillation ventriculaire (c'est-à-dire la survenue de potentiel d'action asynchrone dans les ventricules). C'est ce qui explique la mortalité de l'infarctus du myocarde car la fibrillation aboutit à une inefficacité circulatoire.

Petite conclusion du prof :
- Nous avons décrit de manière non exhaustive certains canaux présents dans les cellules nodales et les cardiomyocytes en orientant notre propos sur les aspects fonctionnels.
- En biologie, il est important de ne pas extrapoler sans vérifier expérimentalement ses hypothèses.

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.