



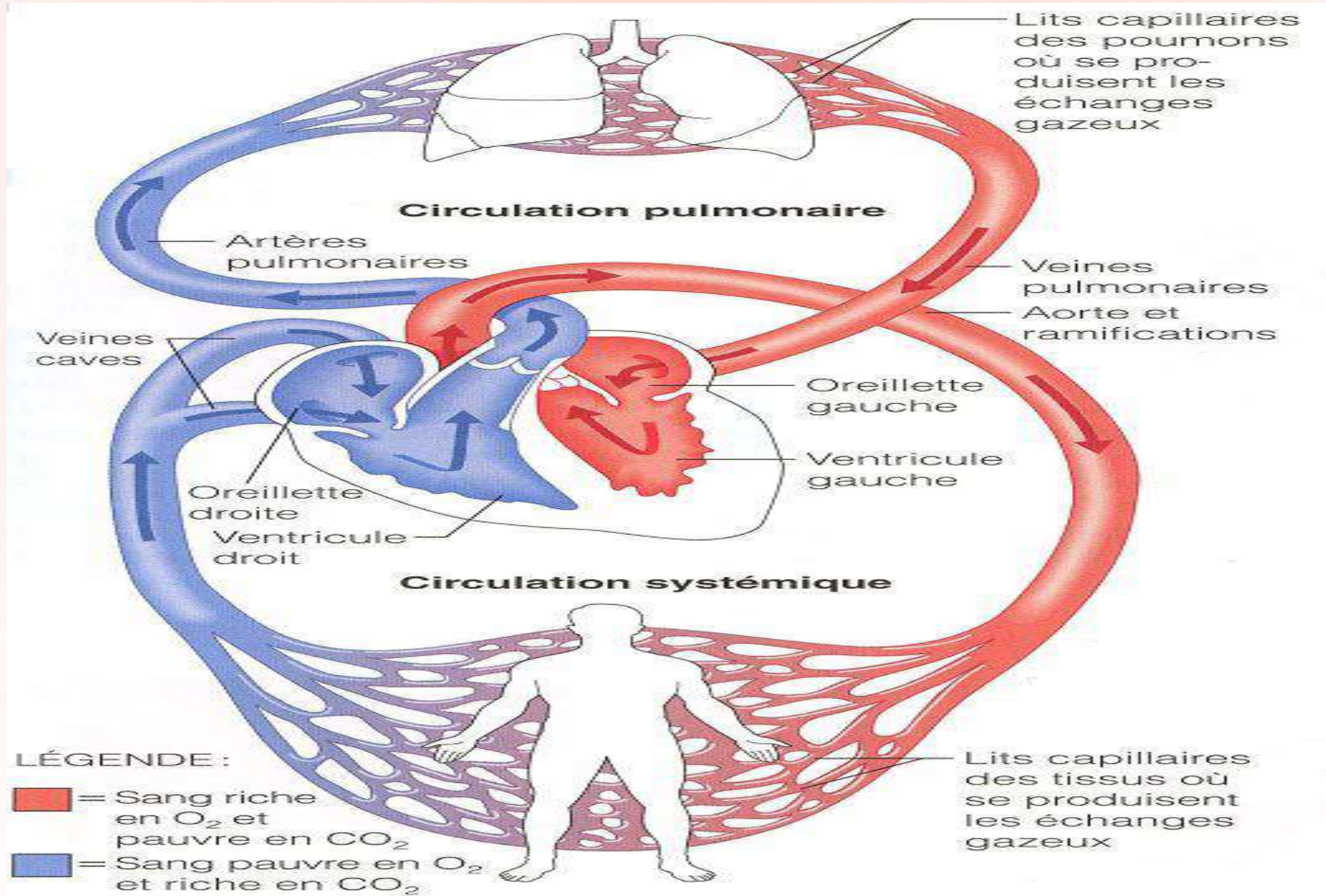
# **Physiologie cardiovasculaire**

# Physiologie cardiovasculaire

L'appareil cardiovasculaire comprend trois parties fondamentales:

- le cœur : une pompe fournissant au sang l'énergie nécessaire à son écoulement vers les tissus;
- les vaisseaux sanguins: les voies de communication par lesquelles le sang circule du cœur vers les tissus et y revient;
- le sang: milieu liquide dans lequel sont transportés des matériaux ( $O_2$ ,  $CO_2$ , nutriments, déchets,...) et des cellules.

# Physiologie cardiovasculaire



# Physiologie cardiovasculaire

**Chapitre 1: Electrophysiologie cardiaque**

**Chapitre 2: Cycle cardiaque**

**Chapitre 3: Débit cardiaque**

**Chapitre 4: Régulation de la pression artérielle**

**Chapitre 5: Système à basse pression**

**Chapitre 6: Circulation coronaire**

**Chapitre 7: Physiologie du sang**



# Physiologie cardiovasculaire

## Chapitre 1: Electrophysiologie cardiaque



# **Electrophysiologie cardiaque**

## **I-Coordination de la fonction cardiaque**

## **II-Propriétés électriques du cœur**

### **A- Excitabilité**

**1- Polarisation: potentiel de membrane**

**2- Activité électrique élémentaire: le potentiel d'action**

**3- Notion de période réfractaire**

**B- Potentiel diastolique et automatisme cardiaque**

**C- Conductivité**

**D- Couplage excitation-contraction**

## **III-Influence du système nerveux autonome sur l'électrophysiologie cardiaque**

## **IV-Anomalies du rythme cardiaque**

## **Conclusion**

# Electrophysiologie cardiaque

## I-Coordination de la fonction cardiaque

- Le cœur est une pompe double, dans le sens où ses côtés droit et gauche pompent le sang séparément, mais simultanément, dans les circulations systémique et pulmonaire.
- Un pompage efficace du sang nécessite une contraction d'abord des oreillettes, suivie pratiquement immédiatement de celle des ventricules.

# Electrophysiologie cardiaque

## I-Coordination de la fonction cardiaque

- La contraction du muscle cardiaque est déclenchée par la dépolarisation de la membrane plasmique.
- Les jonctions connectent les cellules myocardiques et assurent la propagation des potentiels d'action d'une cellule à une autre.
- Une excitation initiale d'une cellule cardiaque aboutit à l'excitation de toutes les cellules du cœur.
- Cette dépolarisation initiale prend normalement naissance dans le nœud sinusal(NSA) et se propage dans la totalité des oreillettes puis dans la totalité des ventricules.



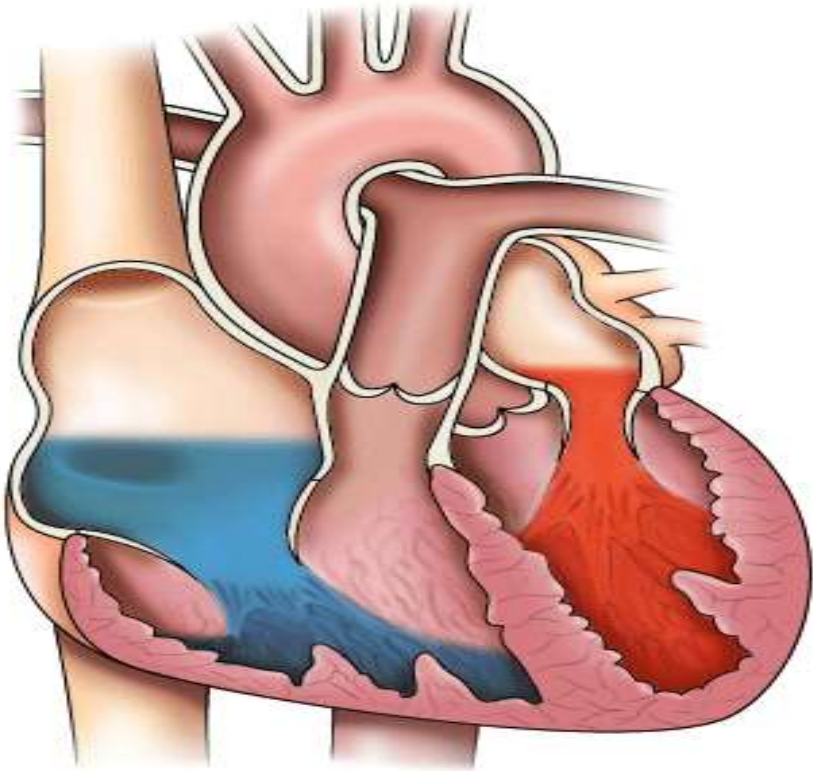
# Electrophysiologie cardiaque

## I-Coordination la fonction cardiaque

- L'évolution de tous les phénomènes de l'activité cardiaque survenant entre deux contractions cardiaques successives correspond au **cycle cardiaque**.
- Suivant un ordre de survenue immuable, les **phénomènes électriques** précèdent toujours les **phénomènes mécaniques**.
- Le cycle cardiaque comprend une **phase d'activité**(dépolarisation et contraction) dite **systole** et une **phase de repos** (repolarisation et relaxation) dite **diastole**.

# Electrophysiologie cardiaque

## I-Coordination la fonction cardiaque



# Electrophysiologie cardiaque

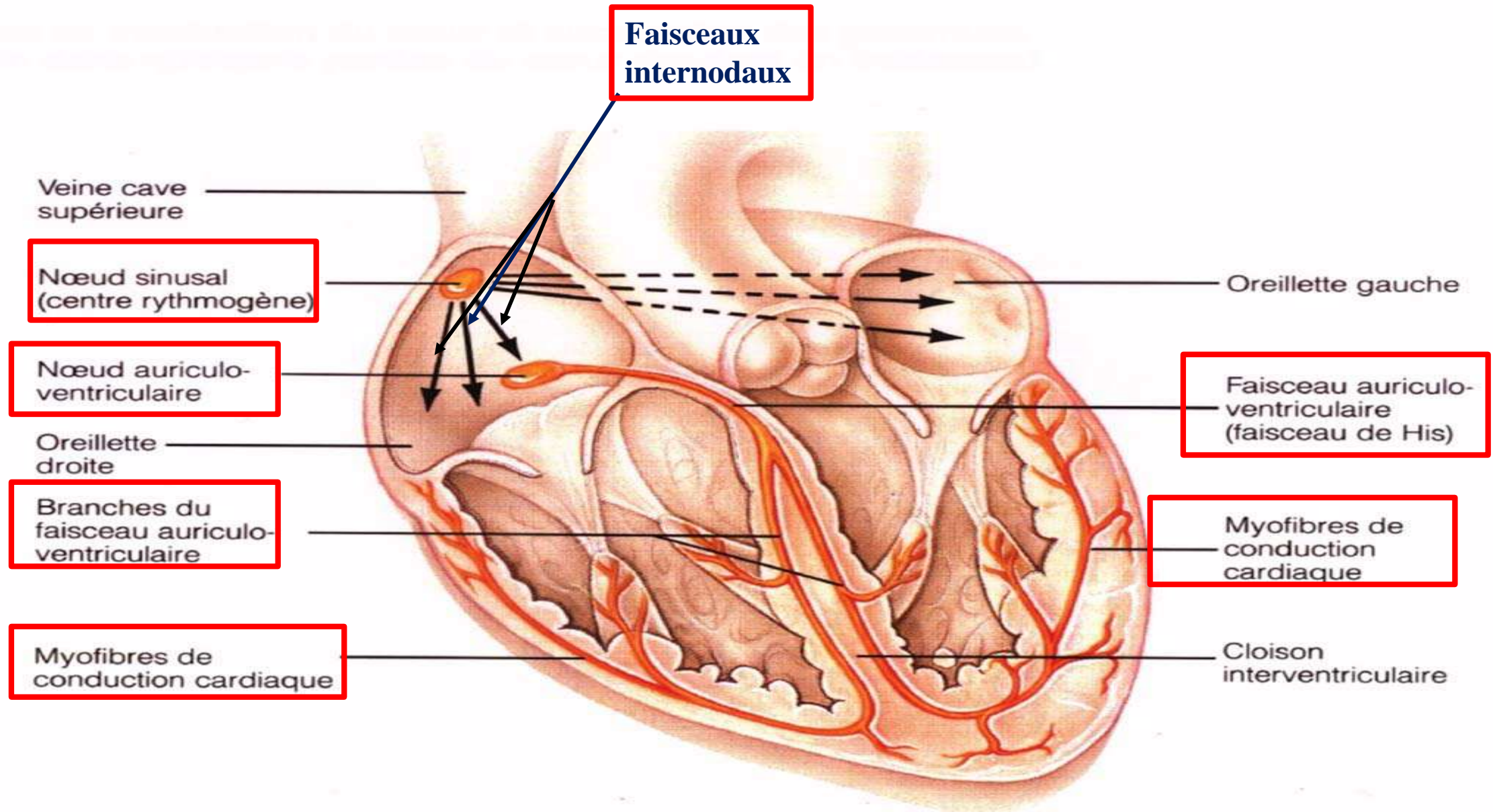
## II-Propriétés électriques du cœur

Trois types de cellules sont individualisables dans le myocarde.

- Les **cellules contractiles** prédominent largement et assurent la contraction.
- Les autres cellules, de deux types, sont **moins nombreuses** sans caractéristique contractile nette:
  - les **cellules conductrices** ou cardionectrices sont capables de se dépolariser spontanément et de transmettre rapidement cette dépolarisation, elles constituent le tissu de conduction;
  - les **cellules myoendocrines**, situées surtout dans le tissu auriculaire, sécrètent les facteurs natriurétiques et interviennent dans la régulation du bilan de sodium.



# Tissu excito-conducteur ou cardionecteur



# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### A-Excitabilité:

- Toutes les cellules myocardiques sont excitables, c'est à dire, lorsqu'elles sont **suffisamment stimulées**, elles répondent par une **dépolarisation** suivie, selon le cas, par une contraction.
- Mais, même sous l'aspect purement électrique, il existe une importante différence de comportement entre les cardiomyocytes situés dans les différentes régions du cœur.



# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### A-Excitabilité

#### 1-Polarisation: potentiel de membrane

Ion	Concentration extracellulaire en mM	Concentration intracellulaire en mM	Potentiel d'équilibre en mV
Na <sup>+</sup>	145	10	+70
K <sup>+</sup>	4	135	-94
Ca <sup>2+</sup>	2	0,1	+132

# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### A-Excitabilité

#### 1-Polarisation: potentiel de membrane

- Au repos les cellules myocardiques sont polarisées, avec une prédominance de charges positives à l'extérieur et de charges négatives à l'intérieur.
- Si deux microélectrodes reliées à un galvanomètre sont placées l'une en extracellulaire et l'autre en intracellulaire, une différence de potentiel s'inscrit, différente selon le type cellulaire, de l'ordre de  $-90\text{ mV}$  pour une cellule ventriculaire, c'est le potentiel de repos transmembranaire qui est déterminé par la conductance au potassium.

# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### A-Excitabilité

### 2-Activité électrique élémentaire: le potentiel d'action (PA)

Les variations de potentiel à l'origine du PA dépendent des courants ioniques entrants et sortants intervenants dans un ordre déterminé..

# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### 2-Activité électrique élémentaire: le potentiel d'action

IL existe deux grands types de PA cardiaques:

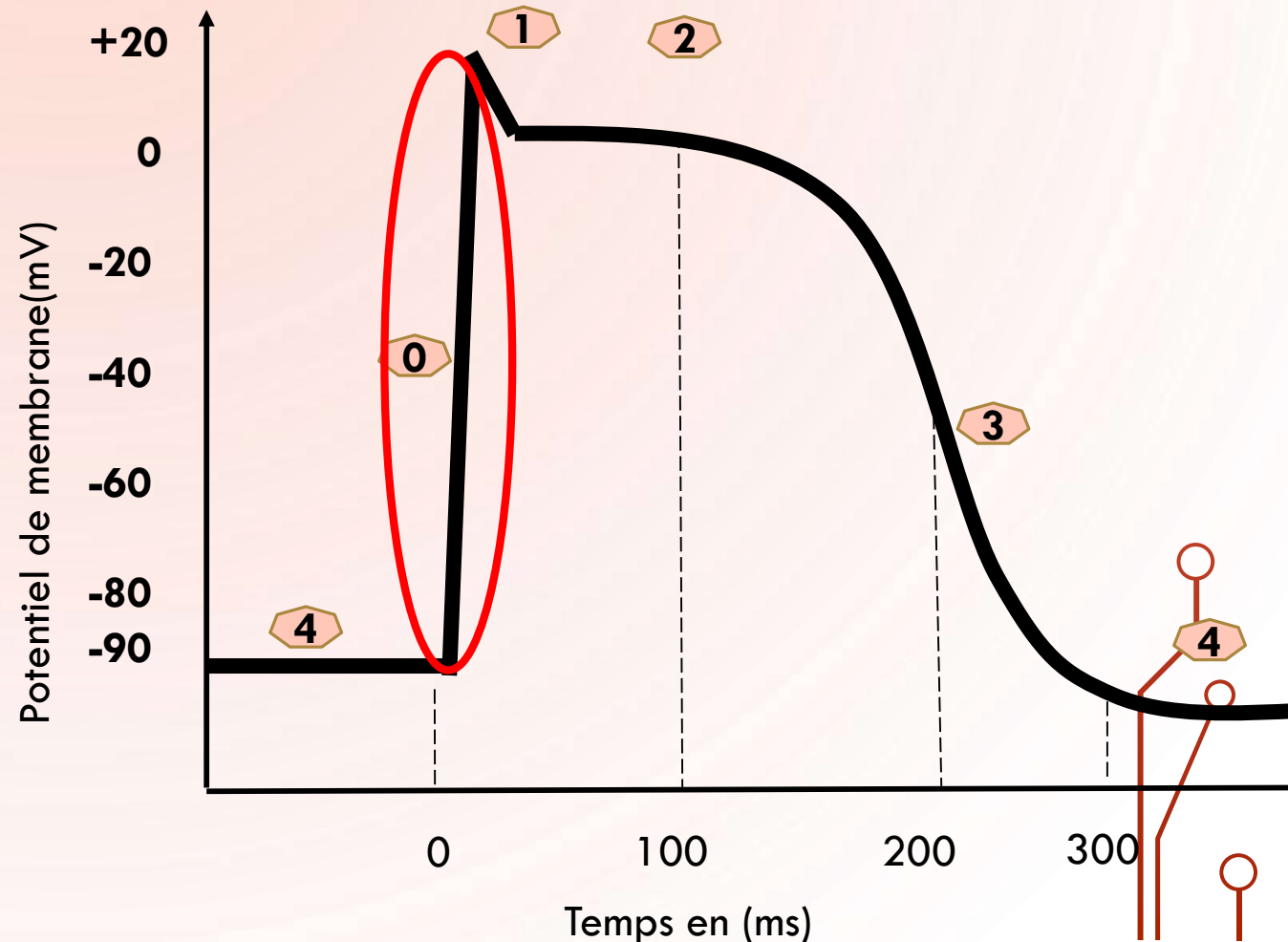
- PA des cellules à dépolarisation rapide: myocarde ventriculaire, myocarde auriculaire, faisceau de His et réseau de Purkinje;
- PA des cellules à dépolarisation lente ou PA lent: nœuds sinusal et auriculoventriculaire;

# Le PA des cellules à dépolarisation rapide comporte cinq phases

## Exemple: PA d'une cellule contractile ventriculaire

### Phase 0: dépolarisation rapide.

Quand une onde de dépolarisation arrive dans une cellule contractile par les jonctions communicantes le PR devient positif (+). Les **canaux  $\text{Na}^+$  voltage-dépendants** s'ouvrent, ce qui entraîne **l'entrée rapide de  $\text{Na}^+$**  dans la cellule. Le potentiel de membrane atteint environ **+20mV** avant la fermeture des canaux  $\text{Na}^+$ . La perméabilité au  $\text{K}^+$  diminue par **fermeture de certains canaux potassiques**.





# Le PA des cellules à dépolarisation rapide comporte cinq phases

## Exemple: PA d'une cellule contractile ventriculaire

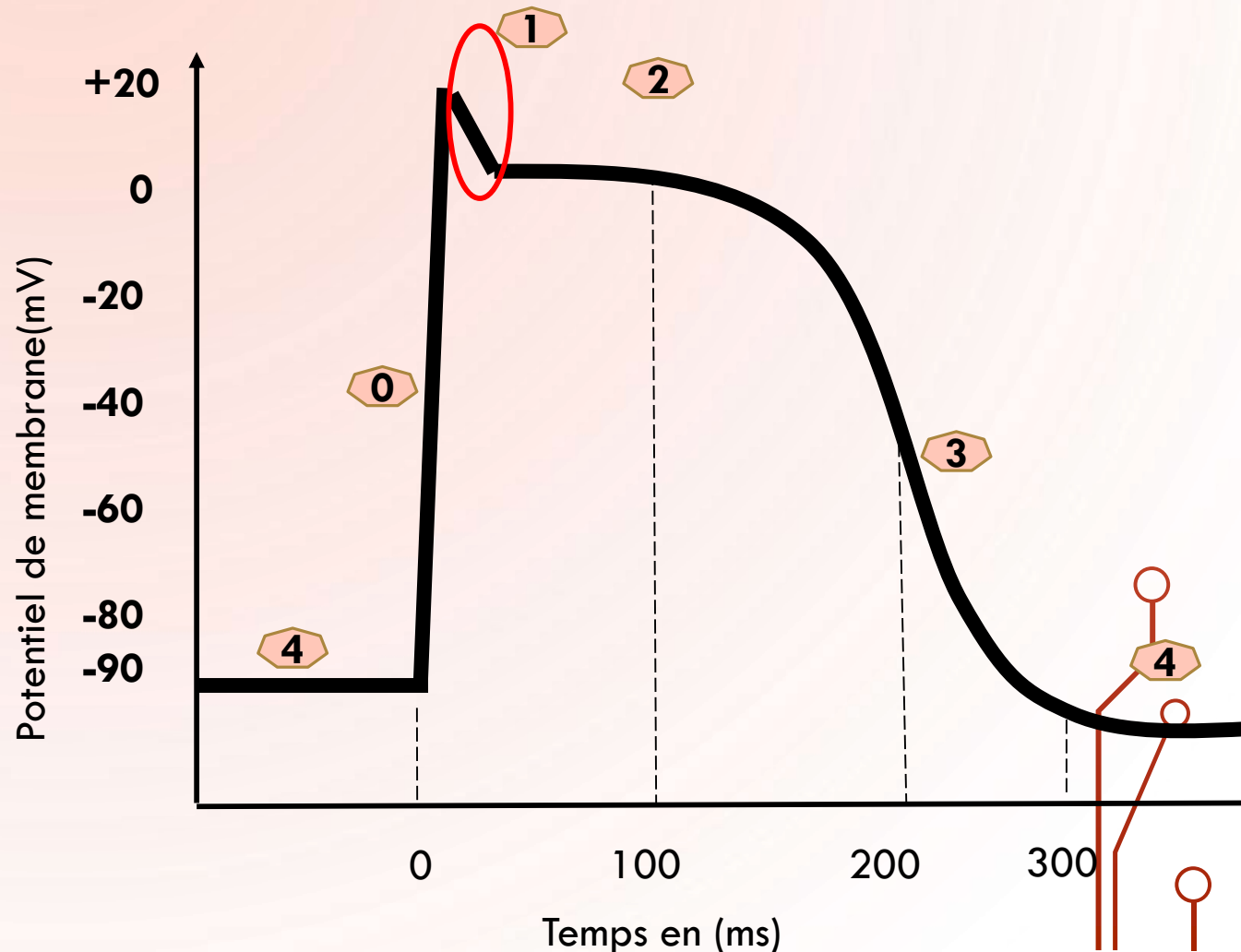
### Phase 1: Début de la repolarisation

(repolarisation initiale rapide).

Fermeture des canaux  $\text{Na}^+$ :

l'augmentation de la perméabilité au  $\text{Na}^+$  est très transitoire, car les canaux sodiques s'inactivent rapidement.

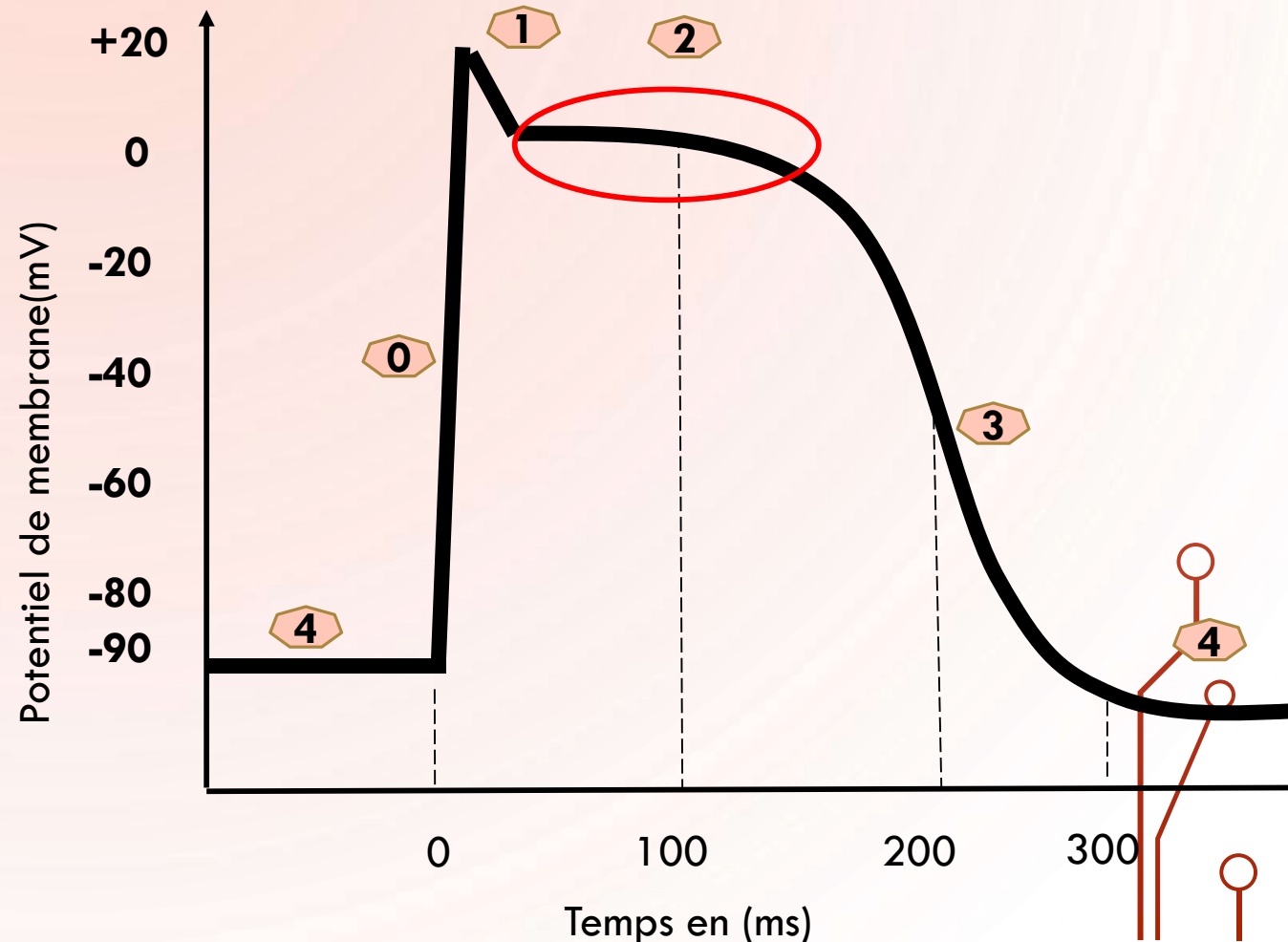
La cellule commence à se repolariser grâce à la **sortie de  $\text{K}^+$**  par les **canaux  $\text{K}^+$  ouverts**.



# Le PA des cellules à dépolarisation rapide comporte cinq phases

## Exemple: PA d'une cellule contractile ventriculaire

**Phase 2: plateau.** Le plateau prolongé résulte d'une **ouverture plus lente** mais plus durable des **canaux  $\text{Ca}^{2+}$  voltage-dépendants**: canaux  $\text{Ca}^{2+}$  de type L (L pour long lasting ou « long terme »). Ces canaux sont activés par la dépolarisation et s'ouvrent lentement durant les phases 0 et 1. Quand leur ouverture s'achève, du  $\text{Ca}^{2+}$  entre dans la cellule.

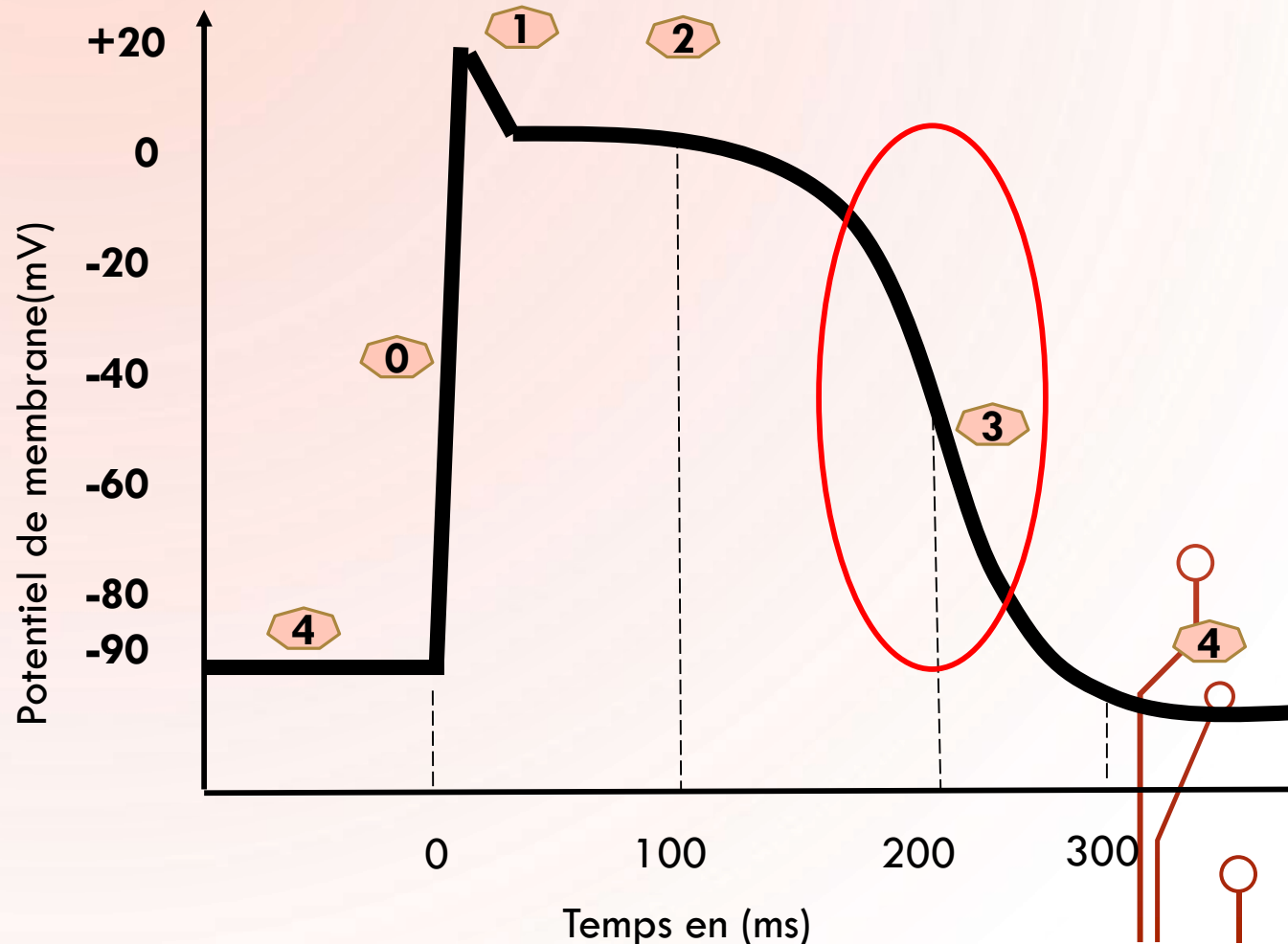


# Le PA des cellules à dépolarisation rapide comporte cinq phases

## Exemple: PA d'une cellule contractile ventriculaire

### Phase 3: Repolarisation rapide.

Fermeture des canaux  $\text{Ca}^{2+}$  de type L et ouverture d'autres sous-types de canaux  $\text{K}^{+}$ . Il y a alors sortie rapide de  $\text{K}^{+}$  et la cellule revient au potentiel de repos.

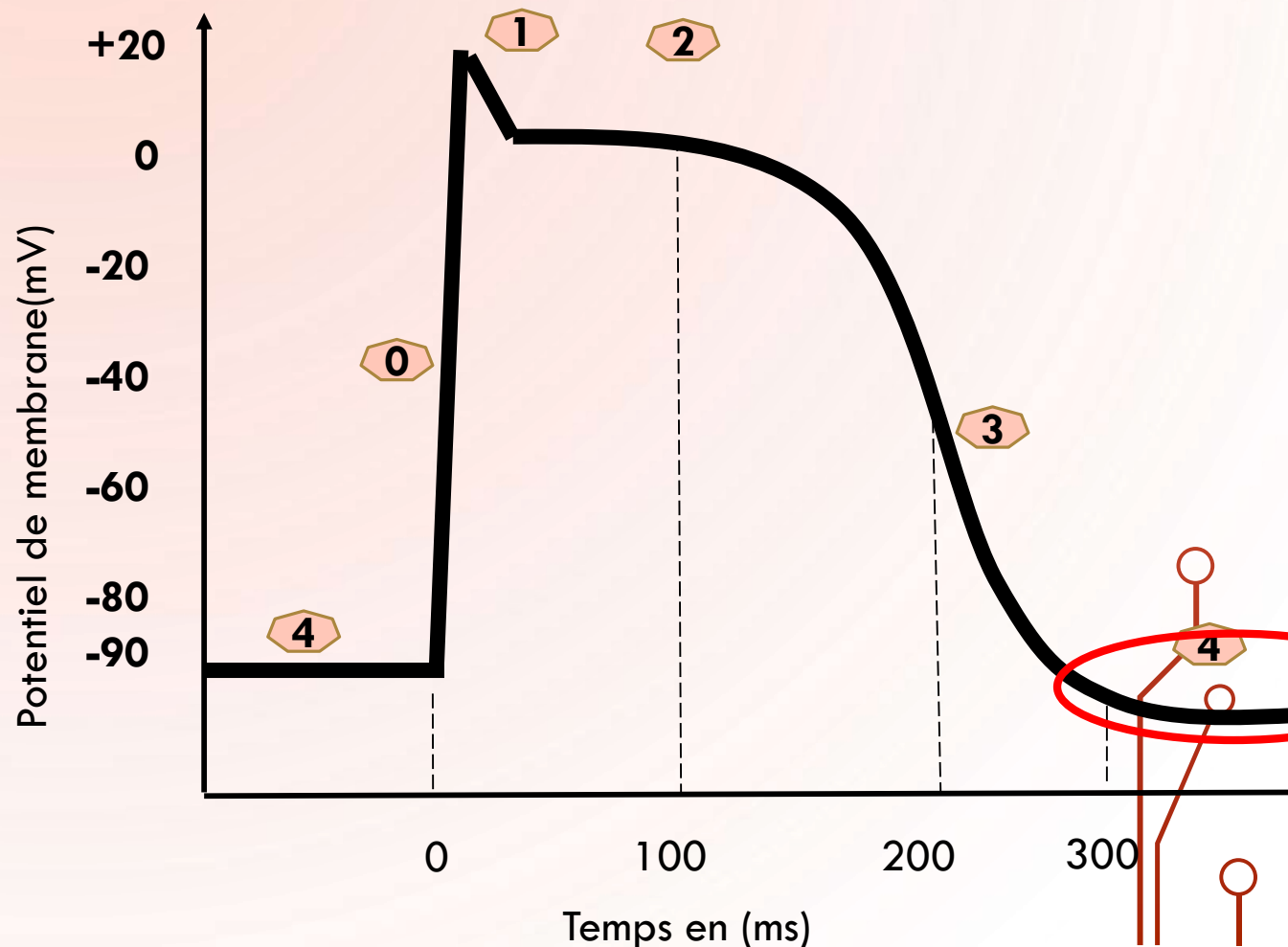


# Le PA des cellules à dépolarisation rapide comporte cinq phases

## Exemple: PA d'une cellule contractile ventriculaire

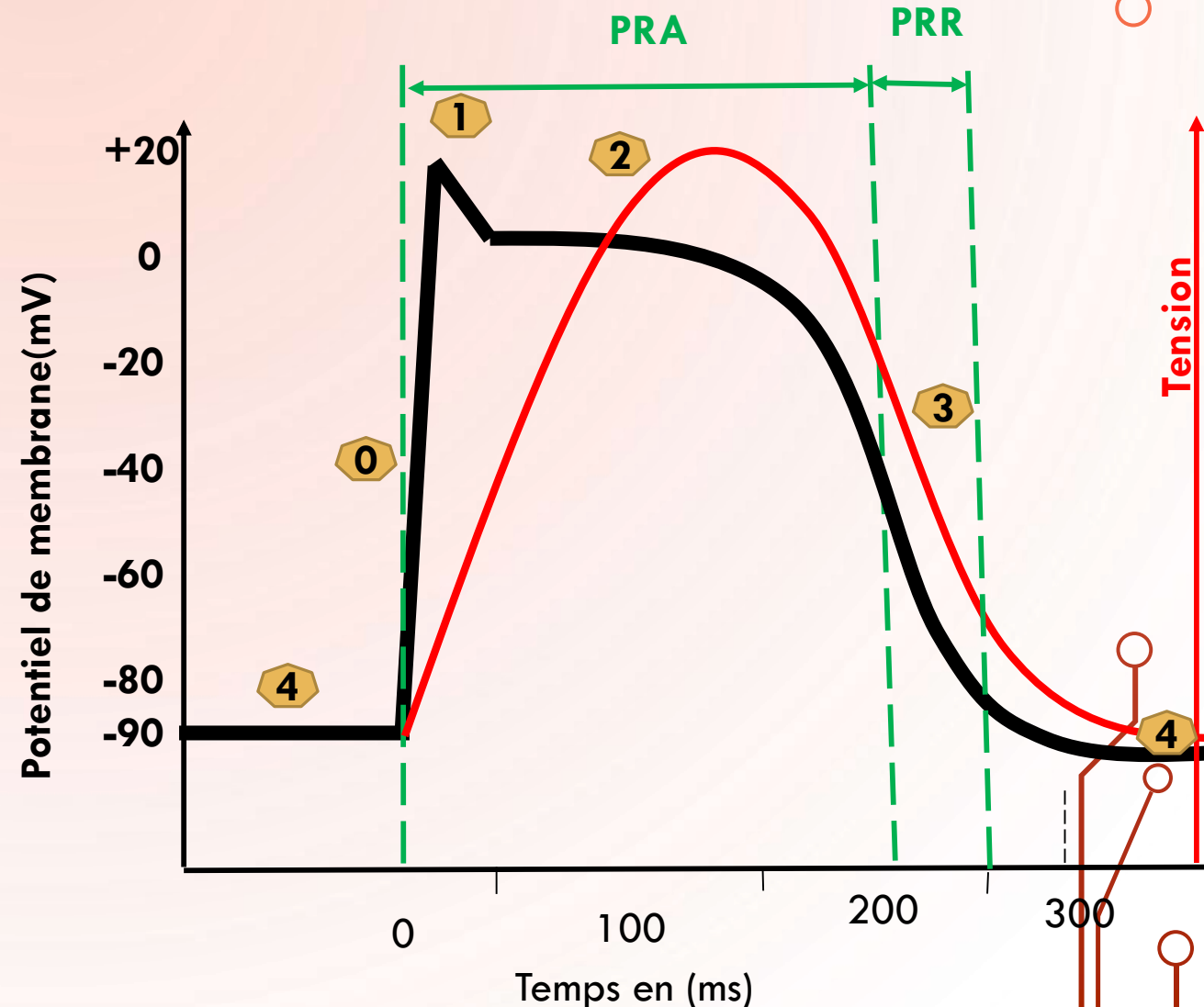
### Phase 4: Potentiel de repos (PR).

- Rééquilibrage avec plusieurs recharges des différents ions mettant en jeu des **échangeurs ioniques**: la **pompe  $\text{Na}^+/\text{K}^+\text{ATPase}$**  et l'**échangeur  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$** . Le PR des cellules musculaires ventriculaires est restauré (-90mV).



# Notion de période réfractaire

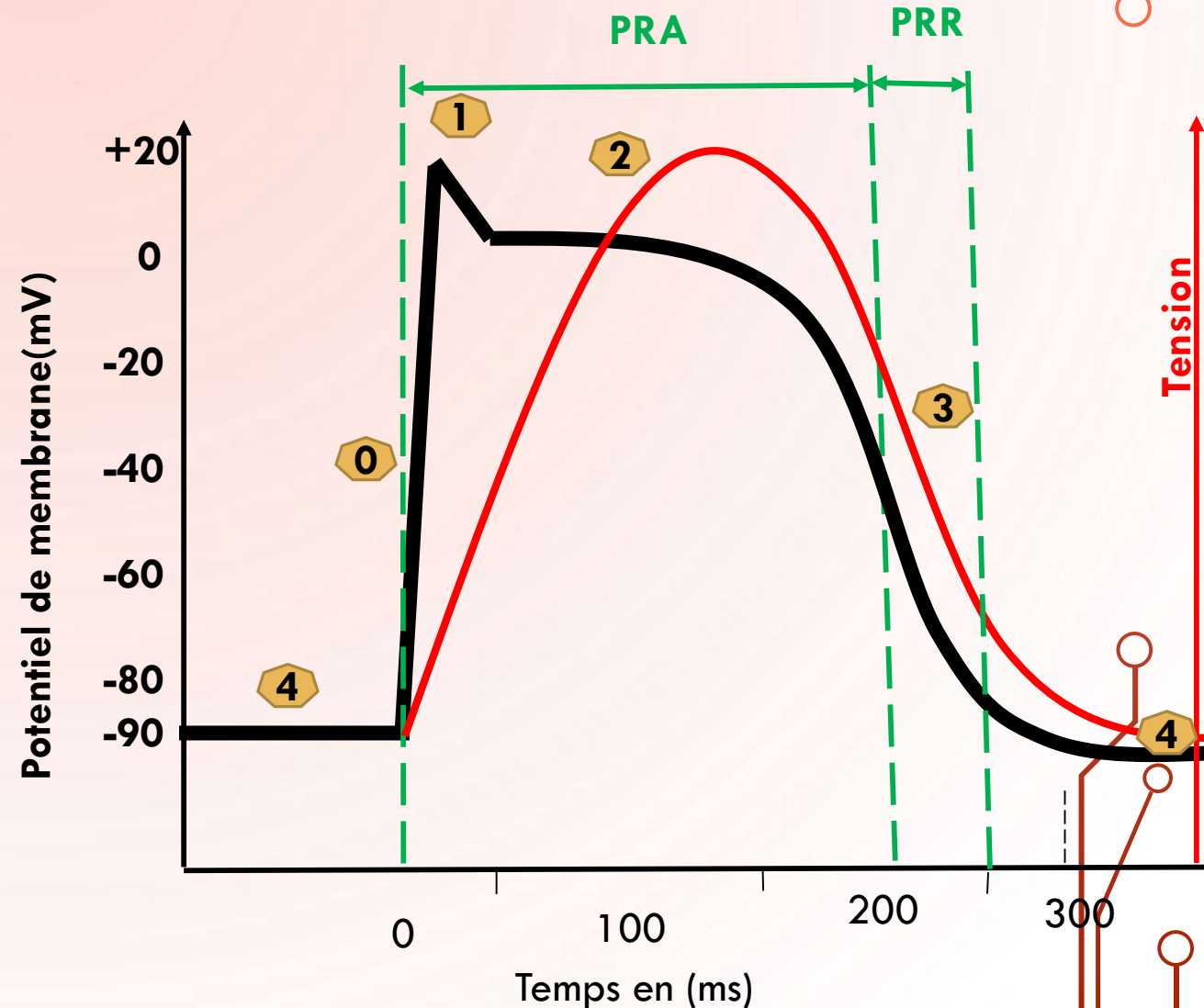
- La réponse contractile du muscle cardiaque commence juste après le début de la dépolarisation.
- Pendant les phases **0** à **2** et pendant près de la moitié de la phase **3**(jusqu'à ce que le potentiel membranaire atteigne environ  $-50\text{mV}$  au cours de la repolarisation), le muscle cardiaque ne peut être excité à nouveau quelle que soit l'intensité du courant. Il est alors dans sa **période réfractaire absolue(PRA)**



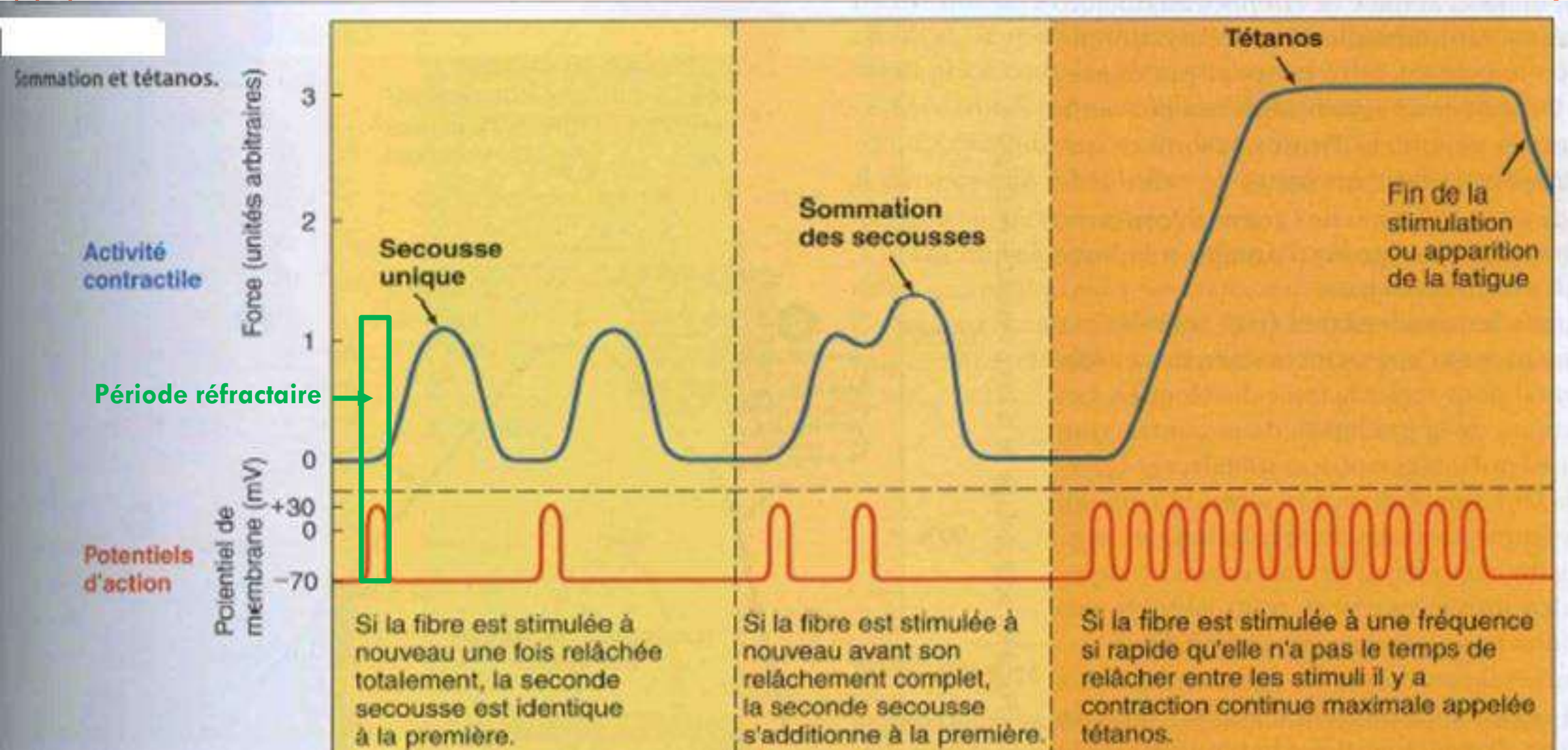


# Notion de période réfractaire

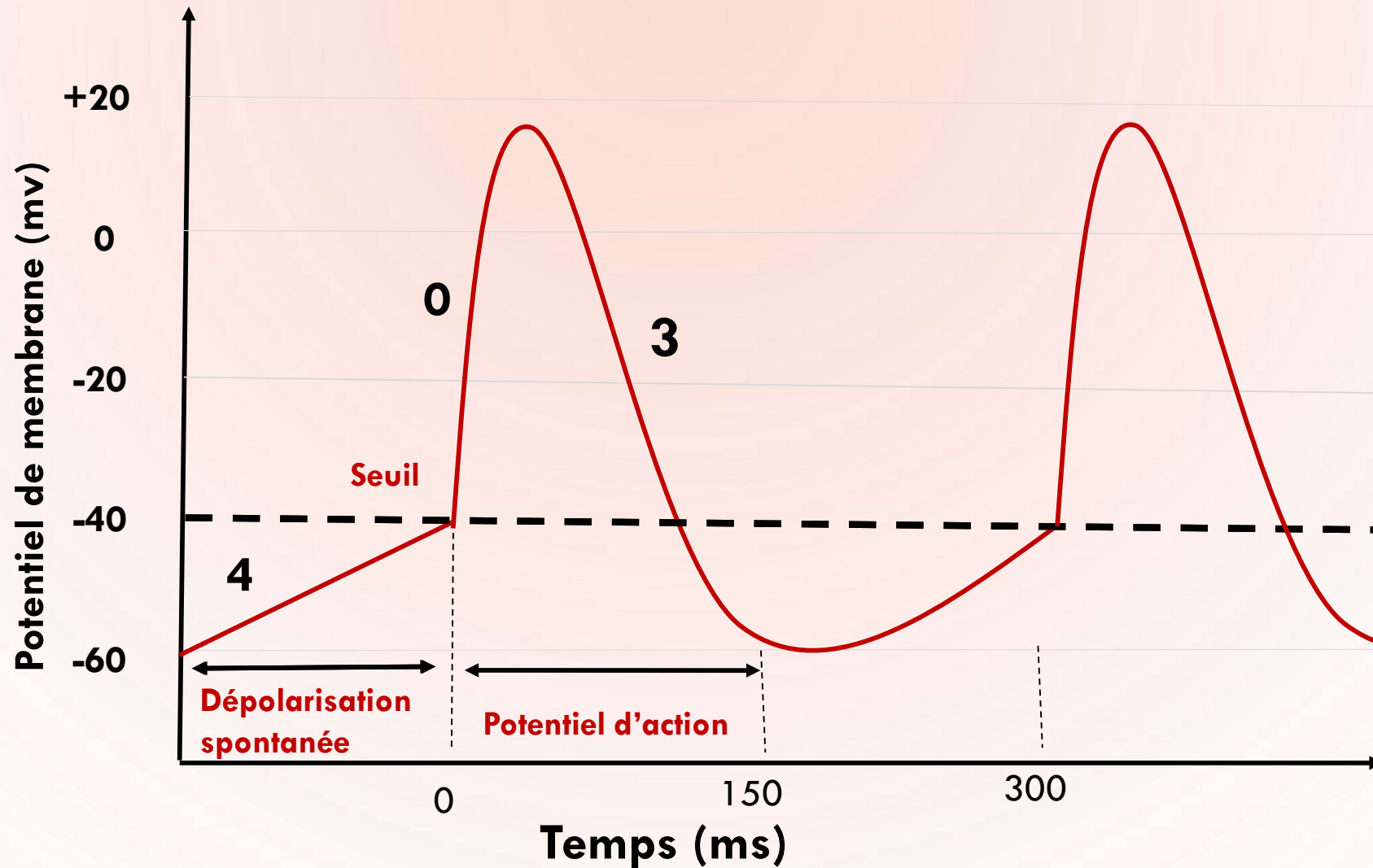
- Il reste **relativement réfractaire** jusqu'à la phase 4 (**PRR**) pour des stimuli d'intensité supraliminaire.
- Par conséquent, à la différence du muscle squelettique, le cœur ne peut pas subir de téтанos. Ce dernier pourrait avoir des conséquences mortelles.



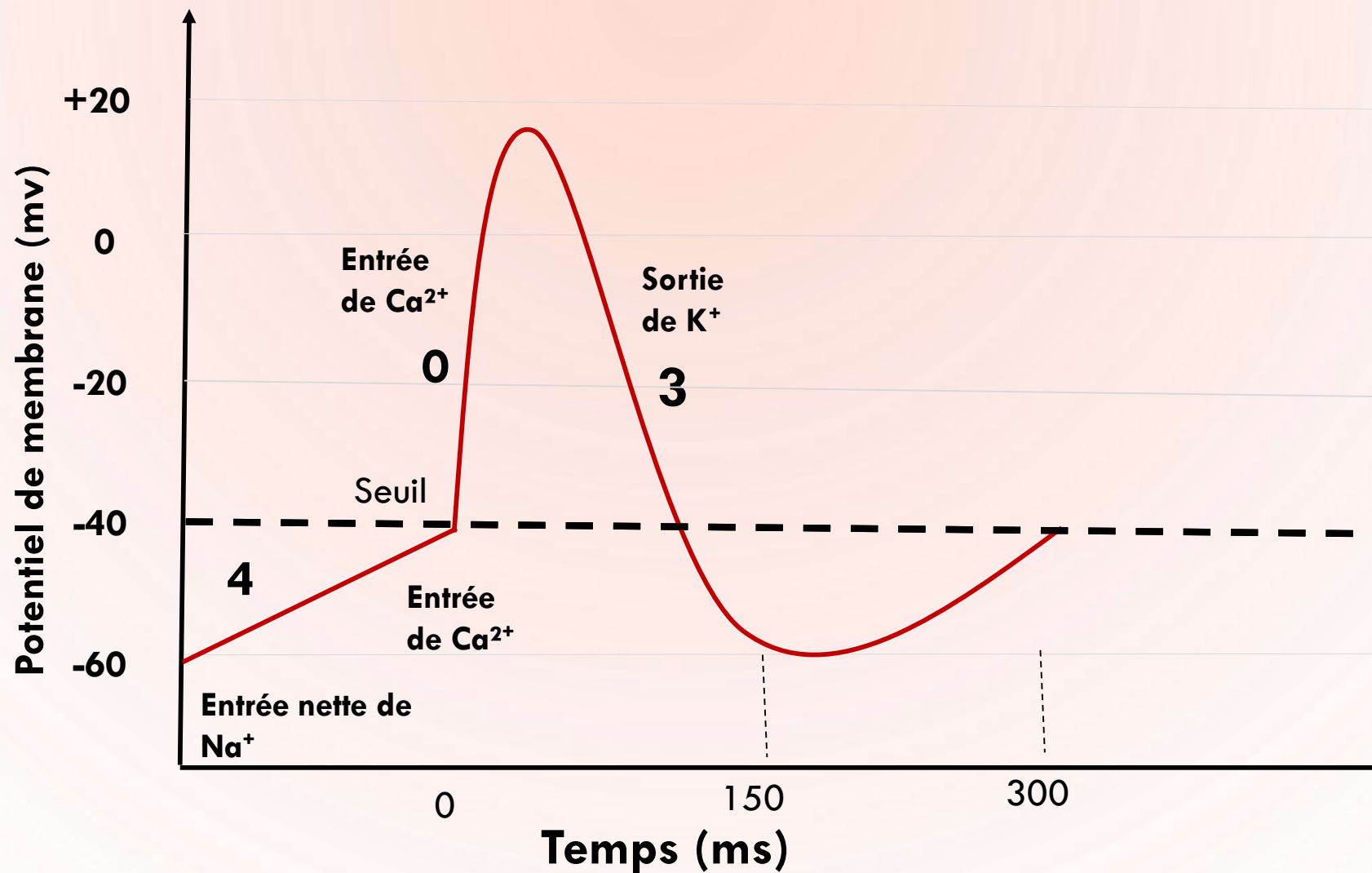
# Notion de période réfractaire: tétanisation du muscle squelettique



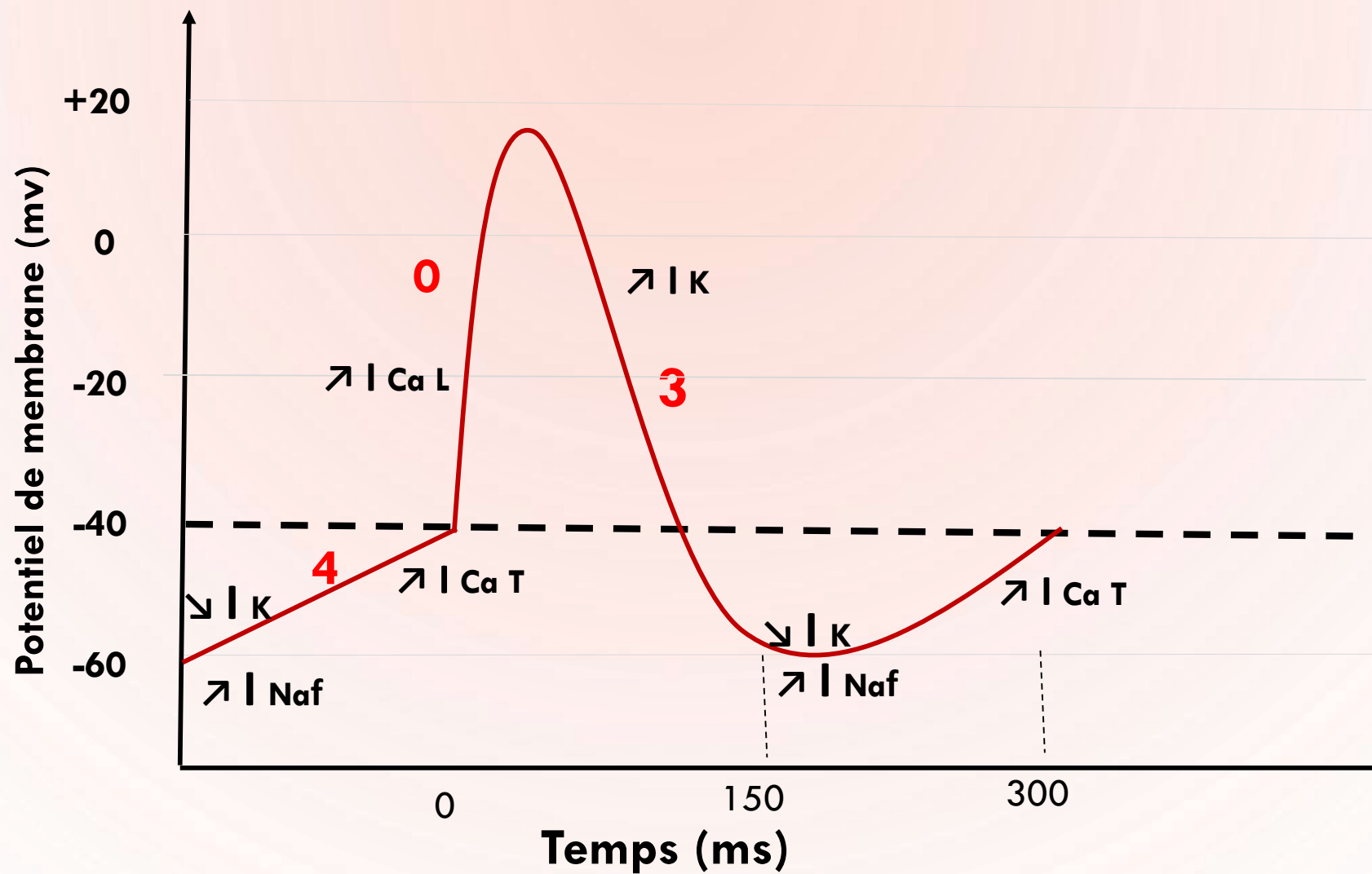
# Le Potentiel d'action des cellules à dépolarisation lente ne comporte pas de phases 1 et 2



# Le Potentiel d'action des cellules à dépolarisation lente



Seuil

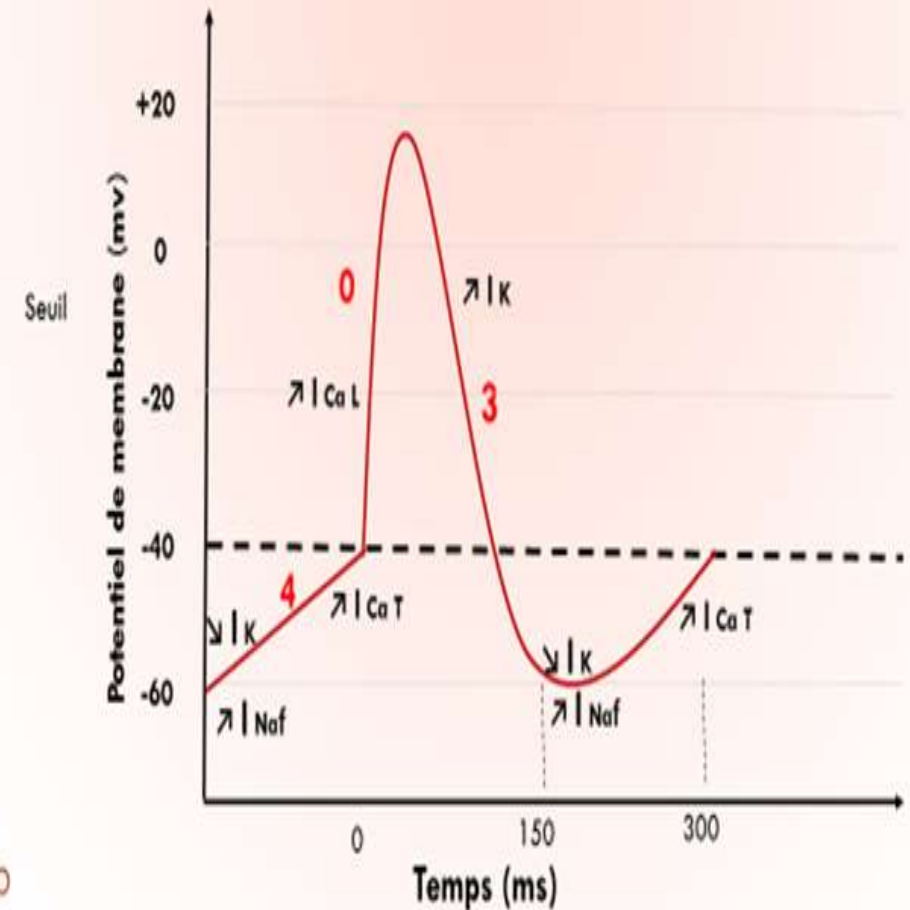




# Le Potentiel d'action des cellules à dépolarisation lente

## Phase 4: potentiel pacemaker (plutôt que potentiel de repos); **dépolarisation spontanée** ou **pré-potentiel**.

- Au potentiel -60mv, le courant K ( $I_K$ ) diminue et entraîne l'activation de canaux permettant le passage de  $Na^+$  et de  $K^+$ .
- Ces canaux sont appelés canaux « f » en raison de leur activité inhabituelle « funny » (drôle).
- Quand ces canaux s'ouvrent, le potentiel de membrane étant négatif, l'entrée de  $Na^+$  l'emporte sur la sortie de  $K^+$ .
- La membrane commence à se dépolariser formant la **1<sup>ère</sup> partie du pré-potentiel**, ce qui entraîne la fermeture des canaux « f », l'ouverture des canaux calciques T (pour transitoires) et les canaux L (pour ouverture de longue durée).
- Le  $I_{Ca}$  achève le **pré-potentiel** jusqu'au seuil.



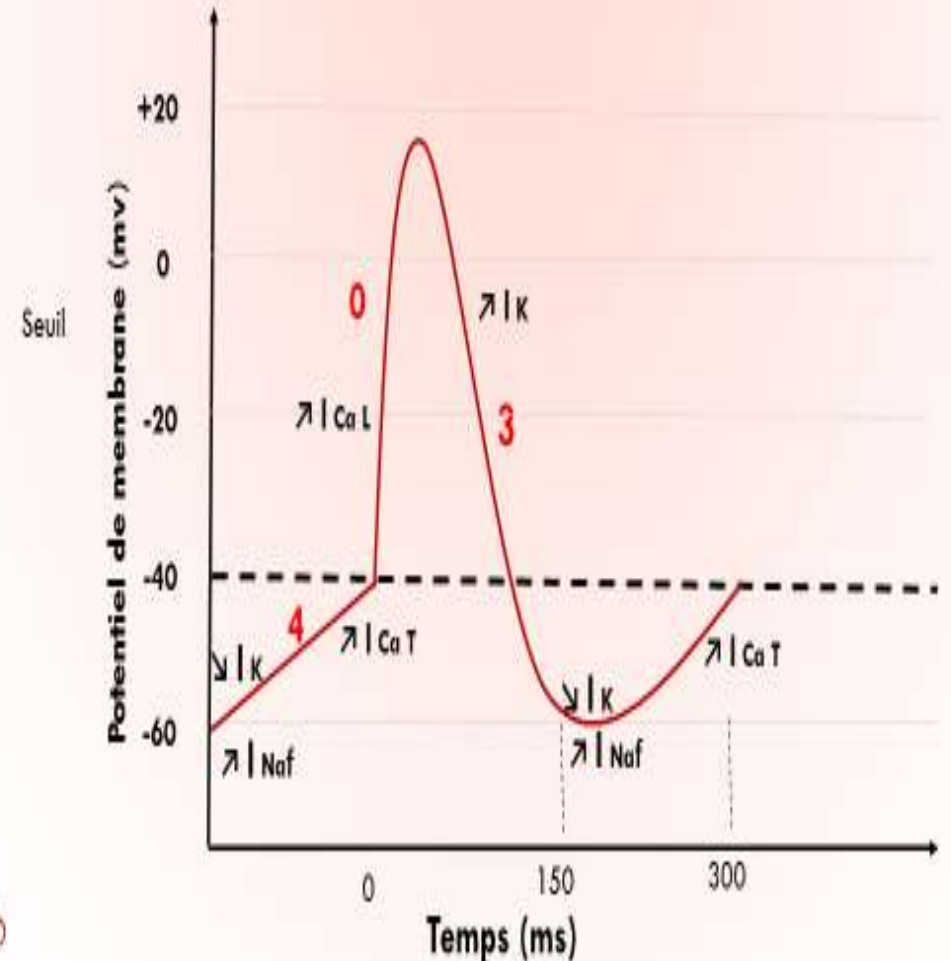
# Le Potentiel d'action des cellules à dépolarisation lente

## Phase 0: dépolarisation.

- Une fois le seuil atteint (-40mV), le courant calcique ( $I_{Ca}$ ) entrant dû à l'ouverture des **canaux calciques de type L** (pour ouverture de **longue durée**) déclenche l'influx (PA).

## Phase 3: repolarisation

- Quand les canaux  $Ca^{2+}$  se ferment au pic du PA, le  **$I_K$**  sortant débute et entraîne la repolarisation grâce à des canaux  $K^+$  ouverts.



# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### 2-Activité électrique élémentaire: le potentiel d'action

**Le PA des cellules à dépolarisation lente; activité électrique spontanée:**

- pas de phases 1 et 2;
- PR faiblement négatif (-60mV);
- phase 0 lente;
- le courant calcique de type L responsable de la phase 0;
- dépolarisation spontanée** durant la phase 4

# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### B-Potentiel diastolique(de repos) et automatisme cardiaque

- Placé en dehors de l'organisme, c'est à dire entièrement déconnecté du système nerveux et des hormones, le cœur continue de battre.
- Cet automatisme mécanique est, fondamentalement, un phénomène électrique: une dépolarisation cellulaire spontanée.
- Toutes les cellules du système de conduction sont automatiques, si leur potentiel transmembranaire est enregistré, une **dépolarisation diastolique spontanée lente** (DDL) est observée.
- La DDL est liée à **des échanges ioniques spontanés**.
- La DDL permet au potentiel membranaire d'atteindre spontanément le seuil de dépolarisation.

# Electrophysiologie cardiaque

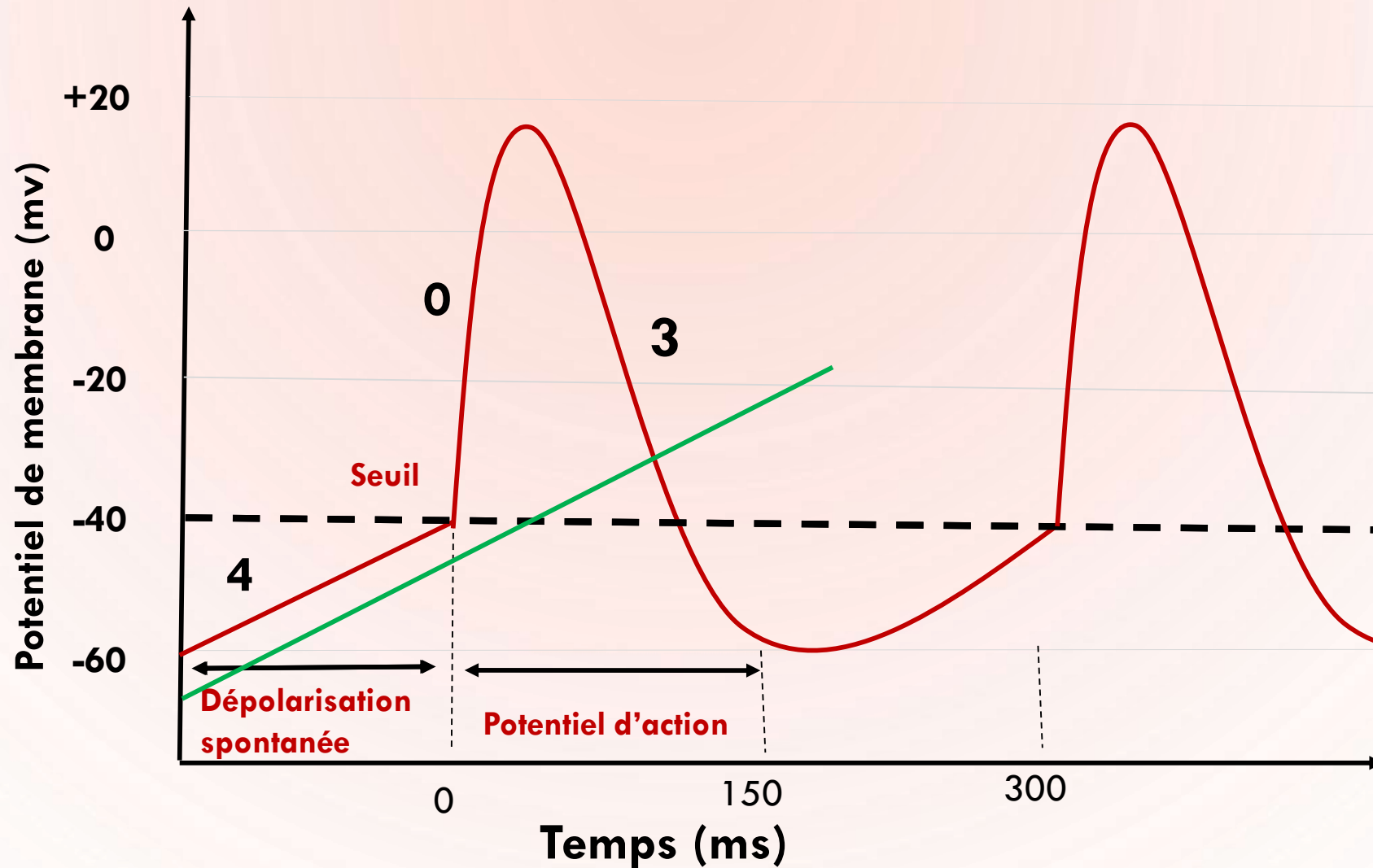
## II- Propriétés électriques du cœur:

### B-Potentiel diastolique(de repos) et automatisme cardiaque

- Plus la pente de la DDL est forte, plus le seuil de dépolarisation est atteint plus facilement, et plus la fréquence de décharge de la cellule cardiaque est accélérée.
- Les cellules du nœud sinusal présente l'automatisme le plus rapide (**pente de DDL plus forte**)et commandent donc le rythme cardiaque. Le nœud sinusal est le pacemaker physiologique ou pacemaker vrai.
- Les autres cellules automatiques sont des pacemakers latents de fréquence de décharge plus lente.



# Le Potentiel d'action des cellules à dépolarisation lente ne comporte pas de phases 1 et 2

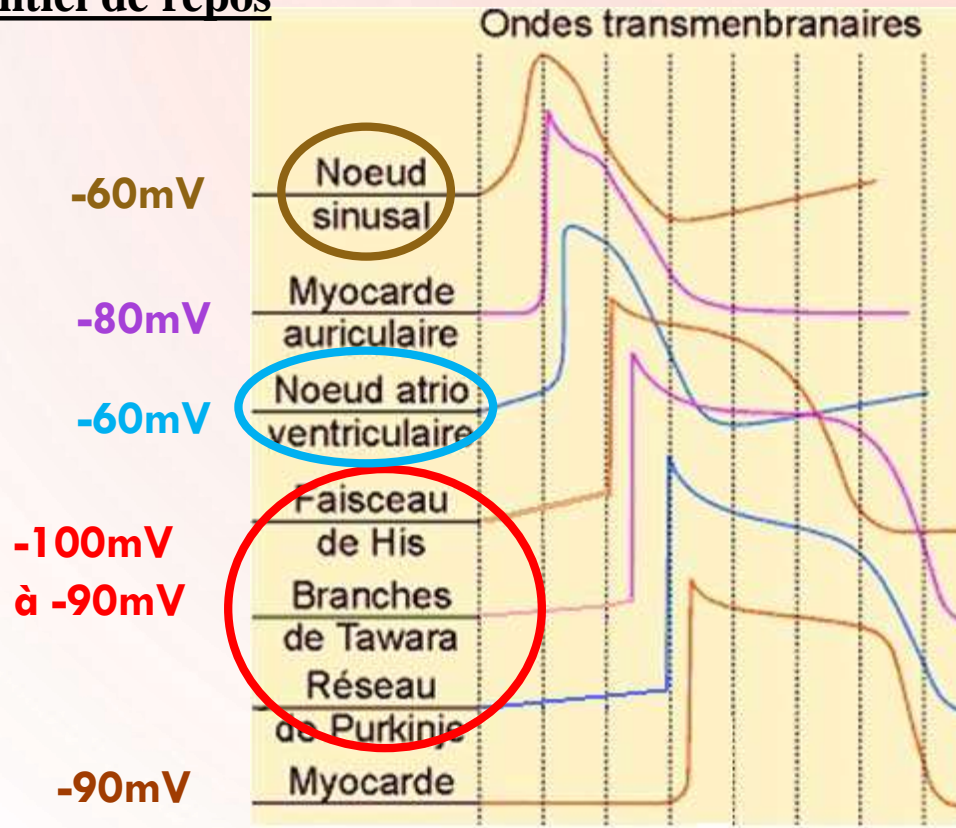


# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### B-Potentiel diastolique(de repos) et automatisme cardiaque

Potentiel de repos



Fréquence de battements

100/min

40 à 50/min

10 à 30/min

# Electrophysiologie cardiaque

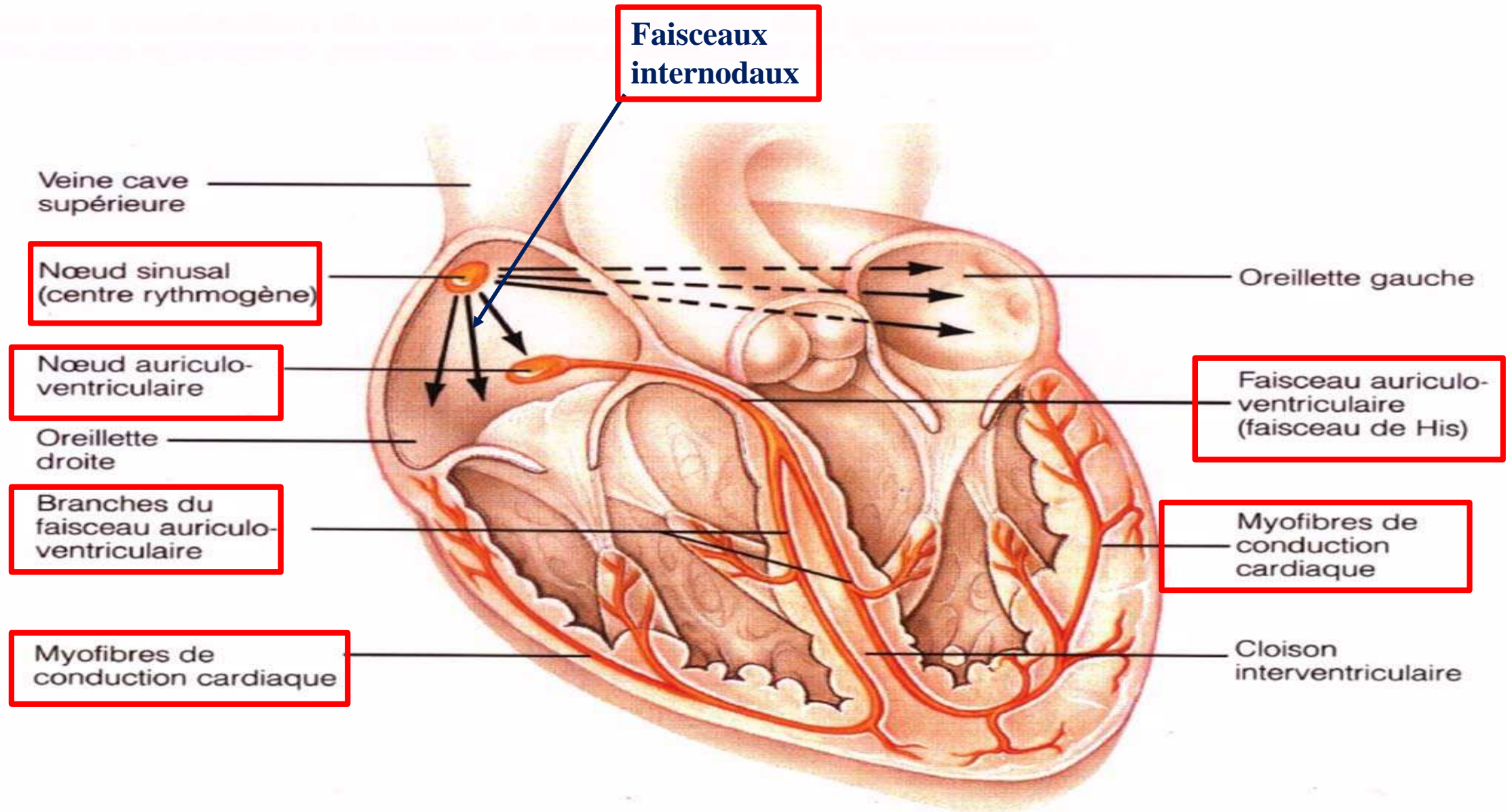
## II- Propriétés électriques du cœur:

### C-Conduction:

#### 1-Dans les oreillettes:

- La dépolarisation apparue dans le NSA se propage radialement dans les fibres musculaires qui constituent les oreillettes. La **vitesse de conduction(Vc)** du tissu auriculaire est d'environ **0,3m/s**.
- Les faisceaux de conduction internodaux assurent la conduction des impulsions jusqu'au nœud auriculoventriculaire (NAV), ils sont au nombre de 3: antérieur, médian et postérieur. Leur **Vc** est de **1m/s**.

# Tissu excito-conducteur ou cardionecteur





# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### C-Conduction:

#### 2-Dans le NAV:

- Il y a un ralentissement de la conduction, le temps de franchissement du NAV est de **0,09s**.
- Ce ralentissement de la conduction est à l'origine du décalage entre la contraction des oreillettes et la contraction des ventricules.



# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

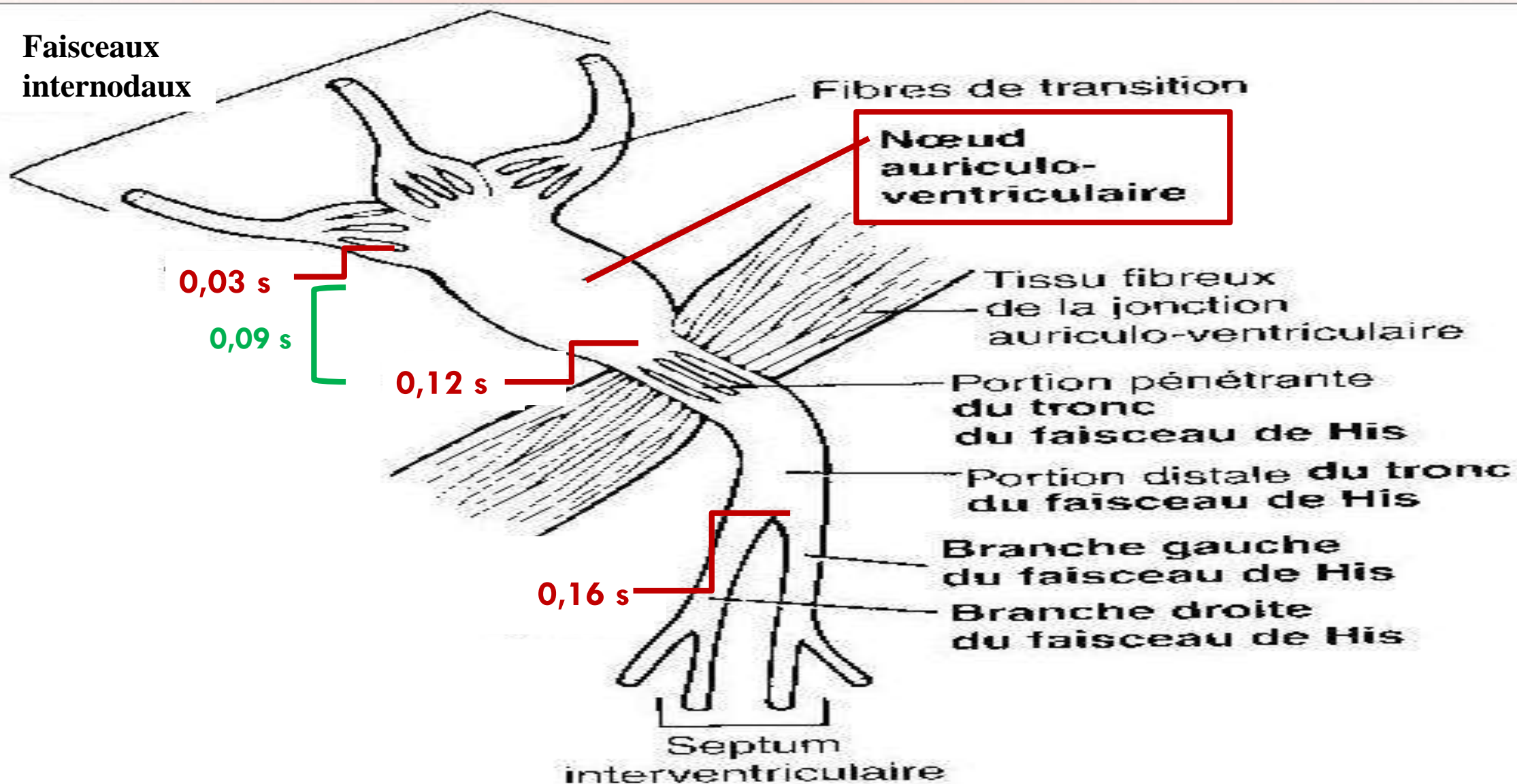
### C- Conduction:

#### 2-Dans le nœud AV

- Pour que la contraction auriculaire soit efficace en terme de remplissage des ventricules, il faut qu'elle survienne pendant que les ventricules sont relâchés et les valves auriculoventriculaires sont ouvertes.
- Ce ralentissement est lié:
  - au petit  $\Phi$  des cellules qui constituent le NAV( le plus petit  $\Phi$  dans tissu de conduction);
  - à la rareté des jonctions communicantes entre cellules voisines à ce niveau.

## Tissu excito-conducteur:

### Durée de transmission de la dépolarisation du NSA aux différentes zones de conduction



# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### C-Conduction:

#### 3-Dans les cellules du faisceaux de His

- La  $V_c$  est la plus élevée du tissu de conduction 1,5 à 4m/s (150 fois  $> V_c$  du NAV).
- La transmission est instantanée dans l'ensemble des deux ventricules. Cette rapidité de transmission est liée à:
  - la taille importante des fibres de ce tissu;
  - la grande perméabilité des jonctions entre cellules conductrices adjacentes.

# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### C-Conduction:

#### 4-Dans les fibres de Purkinje

- Chaque branche du faisceau de His se divise progressivement en un réseau de fines ramifications: les fibres de Purkinje, qui cheminent sous la région sous endocardique et atteint les cellules musculaires myocardiques
- La **durée** de passage de l'impulsion entre le tronc commun du faisceau de His et les fibres de Purkinje est d'environ **0,03 s**.

# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### C-Conduction:

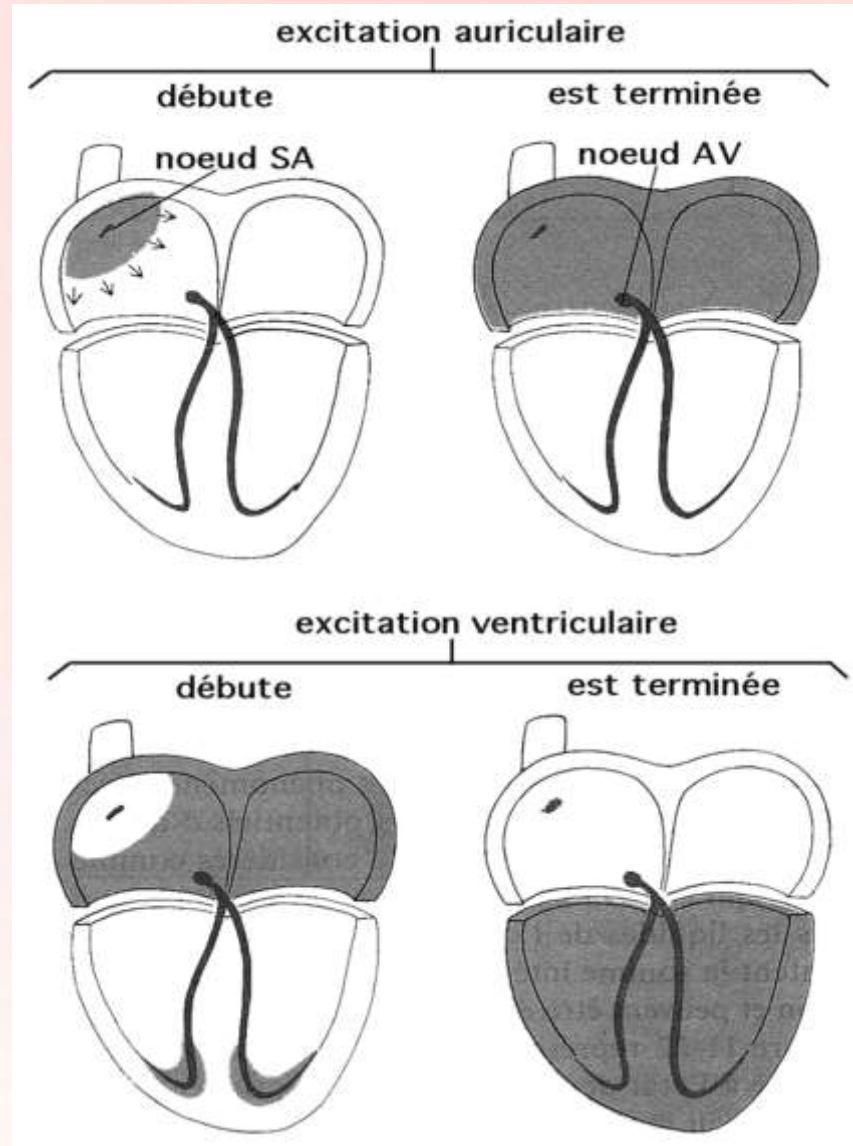
#### 5-Dans les cellules musculaires ventriculaires

- Une fois parvenu à l'extrémité du réseau de Purkinje l'impulsion se transmet à l'ensemble des cellules musculaires ventriculaires: de cellule musculaire ventriculaire à cellule musculaire ventriculaire avec une  $V_c$  de **0,3m/s**.
- L'impulsion passe de l'endocarde vers les l'épicarde avec un décalage de 0,03s donc la contraction de la région endocardique précède de quelques centièmes de seconde la contraction de la région épicaudique.



# Conduction

**Genèse**



**Conduction**

**Ralentissement**

**Conduction**

# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### D- Couplage excitation-contraction(couplage électromécanique):

- L'autoexcitation d'une seule cellule(pacemaker) entraine la contraction synchrone de toutes les cellules du myocarde qui se comporte comme un syncytium.
- Le  $\text{Ca}^{2+}$  extracellulaire entrant dans la cellule par les canaux calciques de type L lors de la phase du PA en plateau déclenche la libération de  $\text{Ca}^{2+}$  par le réticulum sarcoplasmique(RS).
- Ces canaux sont parfois appelés récepteurs des dihydropyridines(DHPR) car ils sont spécifiquement fermés par ces substances.

# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### D- Couplage excitation-contraction:

- La fixation du  $\text{Ca}^{2+}$  externe sur les récepteurs de la ryanodine ouvre les canaux calciques du RS (ces canaux sont fermés par la ryanodine) et le  $\text{Ca}^{2+}$  du RS est libéré.
- Dans le myocarde, les ponts d'actomyosine se forment par désinhibition de l'actine (ce  $\text{Ca}^{2+}$  supplémentaire entraîne la contraction cardiaque par fixation sur les sites de la troponine C).

# Electrophysiologie cardiaque

## II- Propriétés électriques du cœur:

### D- Couplage excitation-contraction:

- Une fois libéré le  $\text{Ca}^{2+}$  intracellulaire est de nouveau stocké dans le RS par la pompe  $\text{Ca}^{2+}$  ATPase du RS.
- C'est ce repompage du  $\text{Ca}^{2+}$  dans le RS qui permet la relaxation des sacromères: il s'agit de l'évènement initiateur de la diastole cardiaque.

# Electrophysiologie cardiaque

## III- Influence du système nerveux autonome sur l'électrophysiologie cardiaque:

- En l'absence de toute influence nerveuse et hormonale sur le NSA, le battement rythmique du cœur se fait à une fréquence de 100batts/min environ: c'est la fréquence de décharge inhérente spontanée du NSA.
- La stimulation parasympathique diminue la FC et la stimulation sympathique l'augmente.
- Au repos, l'activité parasympathique prédomine et la FC de repos = 70batts/min
- Le système sympathique(accélérateur) et parasympathique(freinateur)vont moduler en permanence la fréquence de contraction (chronotropisme).



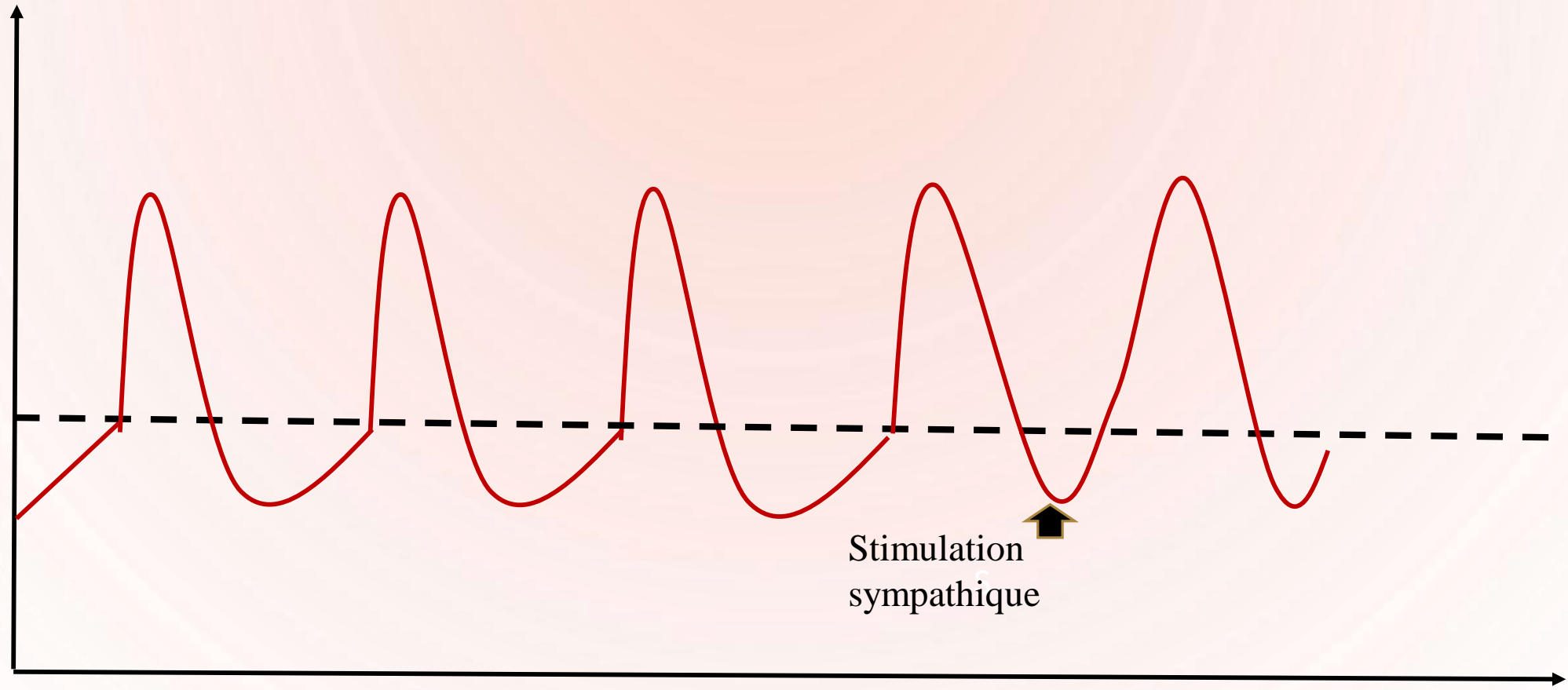
# Electrophysiologie cardiaque

## III- Influence du système nerveux autonome sur l'électrophysiologie cardiaque:

### I-Action du système nerveux sympathique

- La stimulation sympathique augmente la pente du potentiel de pacemaker en augmentant la perméabilité des canaux de type f. Le principal courant traversant ces canaux étant l'entrée du  $\text{Na}^+$  dans la cellule, la dépolarisation est plus rapide. Les cellules du NSA atteignent alors plus rapidement le seuil et la fréquence cardiaque augmente
- De plus la stimulation sympathique, facilite l'ouverture des canaux  $\text{Ca L}$ , ce qui élève l' $\text{I}_{\text{Ca}}$  et accélère la phase de dépolarisation.

# Effet de la stimulation sympathique(noradrénergique)



# Electrophysiologie cardiaque

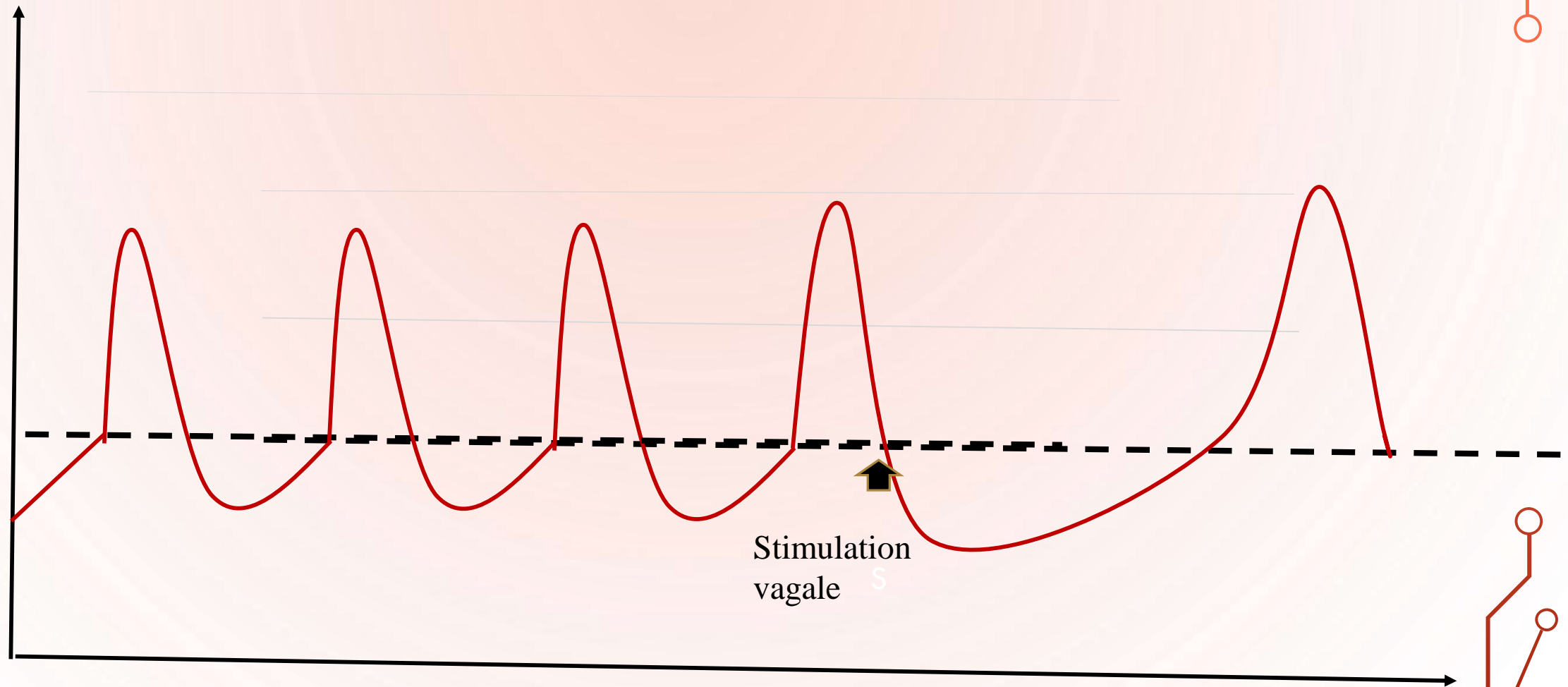
## III- Influence du système nerveux autonome sur l'électrophysiologie cardiaque:

### 2-Action du système nerveux parasympathique

Le parasympathique a des effets inverses:

- une baisse de la pente du potentiel de pacemaker par diminution des courants entrants, le seuil est atteint plus lentement et la fréquence cardiaque diminue;
- une hyperpolarisation de la membrane des cellules du NSA en augmentant leur perméabilité au  $K^+$ :le potentiel de pacemaker démarre alors d'une valeur plus négative et sa pente est réduite;
- un ralentissement de l'ouverture des canaux à  $Ca^{2+}$

# Effet de la stimulation vagale (cholinergique)



# Electrophysiologie cardiaque

## IV- Anomalies du rythme cardiaque

- Chez le sujet normal, chaque contraction est déclenché dans le nœud sinusal(rythme sinusal normal).La fréquence diminue(bradycardie) pendant le sommeil et augmente(tachycardie) sous l'effet des émotions, de l'exercice, de la fièvre et de nombreux autres stimuli.
- En cas de dysfonction du NSA, induite par des médicaments ou des maladies, peut diminuer voire supprimer, la transmission des PA des oreillettes vers les ventricules.
- Dans ce cas, les cellules capables d'autorythmicité du faisceau de His et le réseau de Purkinje, qui ne sont plus entraînés par le NSA, commencent à engendres des excitations à leur propre rythme inhérent, devenant ainsi le pacemaker des ventricules. Ce rythme est assez lent, de 25 à 40batts/min.



# Electrophysiologie cardiaque

## IV- Anomalies du rythme cardiaque

- Aussi, quand le NAV est bloqué, tout synchronisme avec les contractions auriculaires disparaît, celles-ci gardant le rythme normal, plus élevé du NSA.
- Le traitement actuel de tous les troubles sévères de la conduction auriculo-ventriculaire, ainsi que nombreux autres rythmes anormaux, est **l'implantation chirurgicale permanente d'un pacemaker artificiel** qui stimule électriquement les cellules ventriculaires à un rythme normal.

# Electrophysiologie cardiaque

## Conclusion

Dans le cœur, les contractions sont contrôlées par une cascade bien régulée de transmission de signaux électriques qui débute dans le NSA et passe dans le tissu musculaire auriculaire ensuite dans tout le tissu de conduction pour atteindre les ventricules. La propagation du signal électrique d'une cellule à une autre a lieu par le biais de jonctions communicantes. La vitesse de propagation dépend des caractéristiques anatomiques, mais elle peut aussi être modifiée par un influx nerveux.