

E10 CIRCUIT RC COMME MODELE D'UNE FIBRE NERVEUSE

Au cours de cette expérience, vous allez étudier en détail le circuit RC (Résistance et Capacité) qui permet de simuler les propriétés passives d'une fibre nerveuse.

I.- BUT DE L'EXPERIENCE

Dans le corps humain, l'information nerveuse est transmise le long des fibres nerveuses par des potentiels d'action (impulsions nerveuses). La modélisation du potentiel d'action nécessite des composants actifs que nous n'étudierons pas ici. Nous nous contenterons de modéliser les propriétés passives d'un axone avec des circuits RC. Les objectifs sont les suivants:

- 1.- Observer et expliquer la dépendance dans le temps de la tension aux bornes d'un circuit idéal
- 2.- Observer les propriétés d'un circuit RC "réel" comprenant une résistance de fuite sur la capacité.
- 3.- Vérifier expérimentalement sur la modélisation électrique d'un axone la propagation passive des variations de potentiel de membrane le long d'une fibre nerveuse.

II.- APPAREILLAGE A DISPOSITION

Pour effectuer cette expérience, vous disposez d'un micro-ordinateur pour enregistrer les signaux de différents circuits électriques. Ces circuits sont réalisés sur un support en plexiglas comprenant deux montages (I et II).

III.- RAPPEL THEORIQUE

La résistance

La résistance est l'élément le plus simple. C'est un élément dissipatif, c.à.d qu'il transforme l'énergie électrique en énergie calorifique. Expérimentalement on observe que la tension U varie proportionnellement au courant I :

$$(1) \quad U = R I$$

La constante de proportionnalité R définit la résistance.

La capacité.

Lorsque deux conducteurs sont séparés par un isolant, on observe expérimentalement que la tension entre les conducteurs varie proportionnellement au nombre de charges électriques Q déposées sur les conducteurs.

$$(2) \quad Q = C U$$

où C est la capacité du système conducteur - isolant.

Le nombre de charges n'étant pas une quantité aisément mesurable, on écrit la relation (2) en utilisant le courant I qui mesure le nombre de charges ΔQ passant pendant un intervalle de temps Δt :

$$(3a) \quad \Delta Q = I \Delta t$$

et la charge totale s'exprime en sommant tous les ΔQ (notion mathématique d'intégrale) dans l'intervalle de temps compris entre t_1 et t_2 :

$$(3b) \quad Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

et ainsi la relation tension-courant s'écrit:

$$(4) \quad U = \frac{1}{C} \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

Equivalence électrique d'un axone

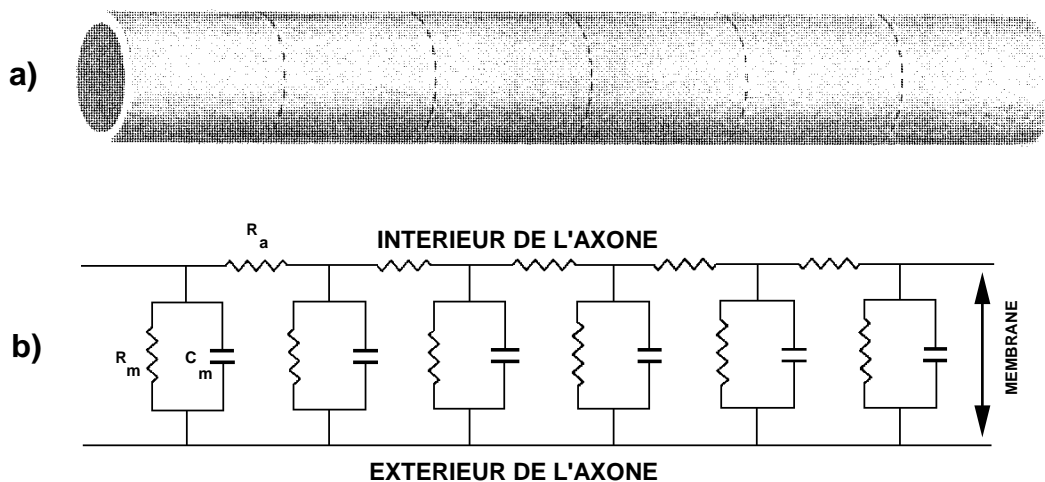


Figure 1.- Segment d'un axone (a) et son circuit électrique équivalent (b)

Les propriétés passives de l'axone illustré sur la figure 1 sont déterminées par:

- la résistance de l'axoplasme (R_a) s'opposant au passage du courant le long de l'axone.
- la résistance de la membrane (R_m) déterminant la fuite du courant.
- la capacité de la membrane (C_m) capable d'emmagasiner des charges électriques à l'intérieur et à l'extérieur de la membrane.

Ainsi un axone peut être assimilé à un câble électrique imparfaitement isolé. L'étude du circuit RC permet une meilleure compréhension des mécanismes de propagation des signaux électriques circulant le long d'une fibre nerveuse.

IV.- DEROULEMENT DE L'EXPERIENCE

L'expérience se déroule en 3 étapes:

- caractéristiques d'un circuit RC idéal
- caractéristiques d'un circuit RC avec une résistance de fuite
- modélisation électrique d'une fibre nerveuse.

a) Le circuit RC idéal

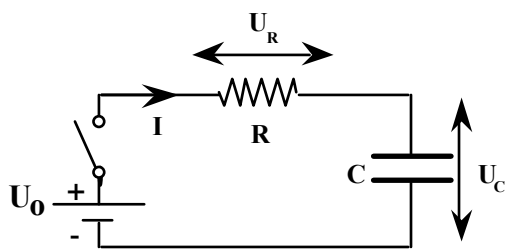


Figure 2.- Circuit RC

Si au temps $t=0$ on ferme l'interrupteur, on observe que le courant I circulant dans le circuit décroît exponentiellement avec un temps caractéristique $T=RC$.

$$(5) \quad I(t) = I_0 \text{Exp} \left[-\frac{t}{RC} \right]$$

avec $I_0 = \frac{U_0}{R}$

On peut calculer l'évolution dans le temps des tensions apparaissant aux bornes de la capacité et de la résistance en se référant aux équations (1) et (4).

$$(6) \quad U_R = U_0 \text{Exp} \left[-\frac{t}{RC} \right]$$

$$(7) \quad U_C = U_0 \left\{ 1 - \text{Exp} \left[-\frac{t}{RC} \right] \right\}$$

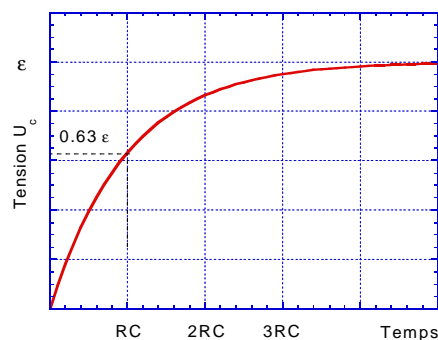
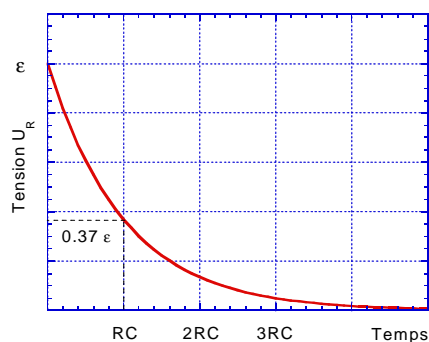


Figure 3.- U_R et U_C en fonction du temps

Notez que 0.37 correspond à $\text{Exp}(-1)$ pour $t=RC$ et $0.63=1-\text{exp}(-1)$

Manipulation

- Réaliser le circuit de la figure 2 avec $R=100\text{ k}\Omega$ et $C=1\mu\text{F}$ en utilisant le montage I de la platine d'expérience.
- Enregistrer les tension U_R et U_C . Imprimer les graphiques et déterminer la constante de temps RC selon la méthode illustrée sur la figure 3.
- Calculer la constante de temps de ce circuit et comparer avec le résultat expérimental

b) Le circuit RC avec une résistance de fuite

Pour tenir compte de la résistance finie de l'isolant d'une capacité, on introduit une résistance de fuite R_f en parallèle avec C.

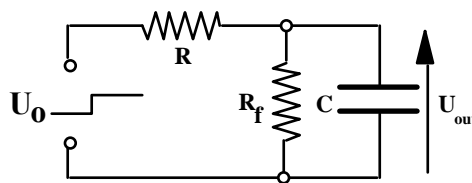


Figure 4.- Circuit RC avec résistance de fuite

Cette résistance de fuite a pour conséquence de créer un diviseur de tension qui limitera la tension aux bornes de C. α est le coefficient d'atténuation du diviseur formé par les résistances R et R_f . L'évolution dans le temps de la tension aux bornes de la capacité est similaire à celle prédite pour le circuit RC idéal.

$$(8) \quad U_C = \alpha U_o \left\{ 1 - \text{Exp} \left[-\frac{t}{\alpha RC} \right] \right\} \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{R_f}{R+R_f}$$

On constate que la résistance de fuite limite la tension aux bornes de C et simultanément diminue la constante de temps du circuit ($\alpha < 1$).

Manipulation

- Réaliser le circuit de la figure 4 avec $R = 100\text{ K}\Omega$ et $R_f = 390\text{ K}\Omega$. Faire un enregistrement sans la capacité puis un deuxième avec une capacité $C = 1\mu\text{F}$.
- Vérifier que la tension aux bornes de C en fonction du temps suit bien l'équation (8).
- Déterminer le coefficient d'atténuation α .
- Déterminer la constante de temps. Comparez-la avec celle prédite par l'équation 8.

c) Simulation des propriétés électriques passive d'une fibre nerveuse.

En examinant le circuit électrique équivalent d'un axone (Fig. 1) on constate que la résistance finie de la membrane de la fibre nerveuse (R_m) et la résistance de l'axoplasme (R_a) causent une atténuation du signal avec la distance. Cette atténuation suit la loi:

$$(9) \quad U(x) = U(o) \text{Exp}\left[-\frac{x}{\lambda}\right] \quad \text{avec} \quad \lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_a}}$$

r_a exprime une résistance par unité de longueur [ohm/mètre] et r_m une résistance fois une unité de longueur [ohm·mètre]. En effet plus le nerf est long, plus R_a sera grand et inversement plus R_m sera petit. λ est la constante d'espace de la fibre nerveuse qui dépend uniquement de ses caractéristiques électriques passives. La constante d'espace équivaut à la distance à laquelle $U(x) = 0.37 U(0)$ (distance sur laquelle une variation de potentiel est atténué du facteur $\text{Exp}(-1)$).

Manipulation

Pour réaliser cette expérience, vous allez utiliser les 8 circuits RC en série du **montage II**. Chaque circuit RC correspond à un segment d'une fibre nerveuse. Pour simplifier on va rapporter les valeurs des éléments utilisés, à cette longueur fictive que l'on appellera segment. Pour commencer on ne considérera que les résistances :résistance de fuite de la membrane $r_m = 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{segment}$ et résistance de l'axoplasme $r_a = 10 \text{ k}\Omega / \text{segment}$.

- Déterminer expérimentalement la constante d'espace. Comparer vos résultats avec les prédictions de l'équation (9).

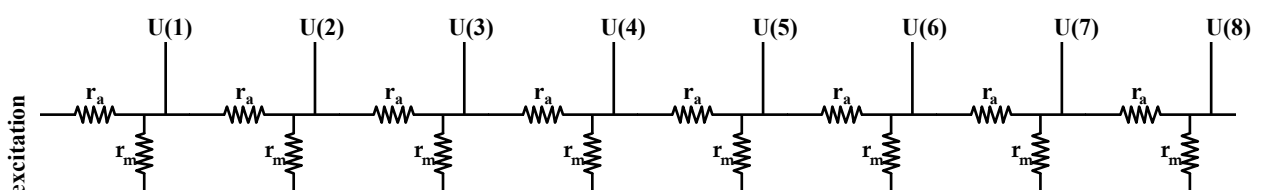


Figure 5.- Schéma de l'expérience pour mesurer la constante d'espace

- Insérer les capacités de $1 \mu\text{F}$ comme indiqué sur la figure 6 ($r_a=10 \text{ k}\Omega/\text{segment}$ et $r_m = 100 \text{ k}\Omega \cdot \text{segment}$). Vous obtenez ainsi une chaîne de circuits RC réels (figure 4).

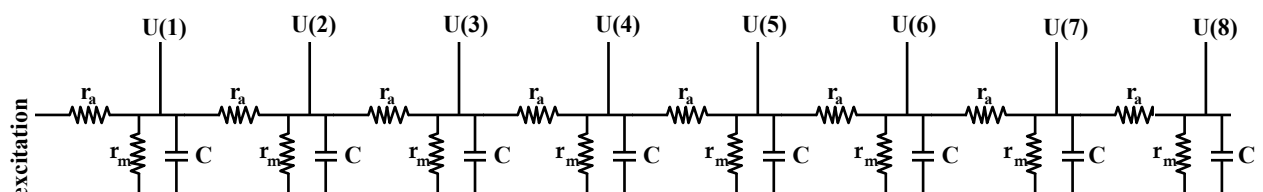


Figure 6.- Schéma d'une portion d'une fibre nerveuse

- Réaliser un enregistrement et évaluer la constante de temps de $U(8)$.

- Enregistrer la réponse du circuit de la figure 6 lorsque le signal d'excitation est constant.
- Discuter alors la nature des délais de propagation d'un signal électrique le long d'un axone et les causes possibles d'une transmission plus ou moins rapide d'un potentiel d'action le long d'un axone.

Complément

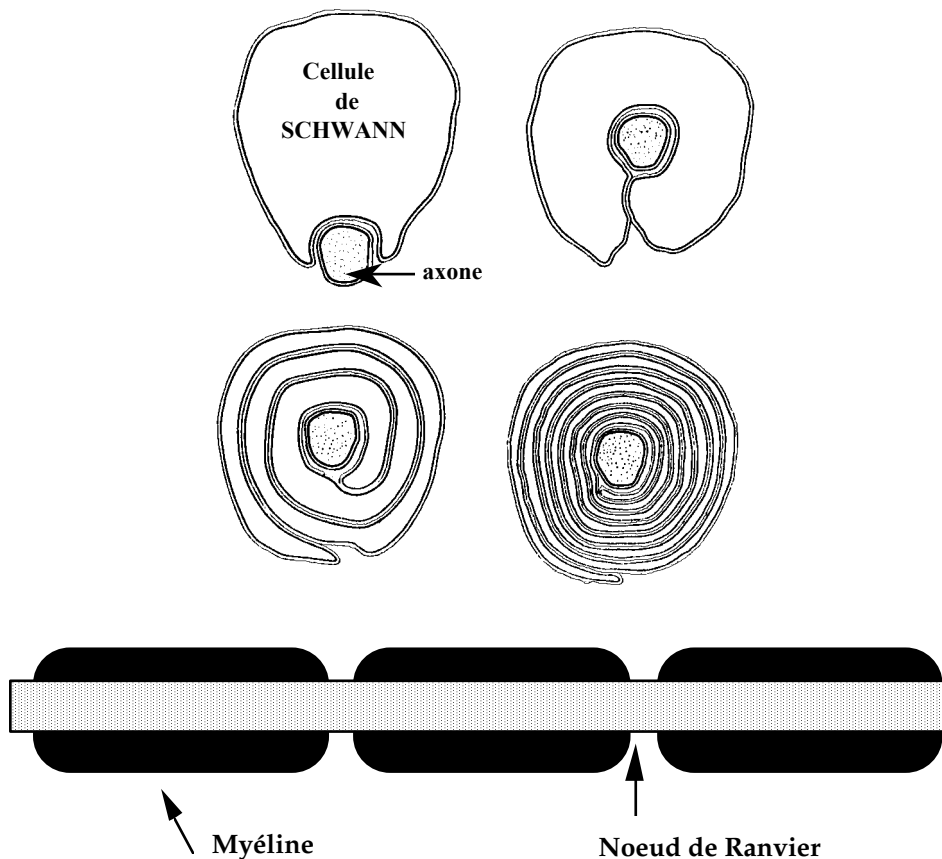


Figure 7.- Myélinisation d'une fibre nerveuse

Certains axones sont entourés de cellules de Schwann qui forment une gaine de myéline, réduisant la capacité de la membrane (la capacité diminue lorsque la séparation entre deux conducteurs augmente) et accroissant sa résistance. Cette gaine permet au courant de se propager sur une plus grande distance. La constante d'espace typique pour un axone non myélinisé est de $50\mu\text{m}$ alors qu'elle est de $700\mu\text{m}$ pour l'axone myélinisé. Le courant parcourt donc une distance plus importante sur les axones myélinisés, alors que dans des axones non myélinisés, les signaux s'atténuent sur une distance plus courte.