PHYSIQUE

Durée : 3 heures 30 minutes

L'usage d'une calculatrice est <u>autorisé</u> pour cette épreuve
L'usage d'abaques et de tables est <u>interdit</u> pour cette épreuve

<u>Les deux problèmes sont indépendants</u>

Les commentaires en italique sont donnés à titre indicatif ; leur lecture n'est pas indispensable à la résolution des problèmes

Problème I : Aspect électrique de la technique du *Patch Clamp*

Inventé par E. Neher et B. Sakmann, le patch-clamp (ou l'électrophysiologie cellulaire) est la technique de référence pour l'étude électrophysiologique des canaux ioniques. Chaque canal est traversé par un flux ionique élevé (de l'ordre de 10^6 ions/seconde) et génère un courant électrique. Le patch-clamp consiste donc à enregistrer l'activité électrique d'une membrane cellulaire.

I. Préliminaires :

1.1. Étude de la loi d'Ohm :

On considère un milieu homogène conducteur de conductivité électrique σ . Une charge, de masse m et de charge q , est susceptible de se déplacer librement à l'intérieur de ce matériau mais subit au cours de son mouvement de nombreux chocs que l'on modélise globalement par une force de frottement du type $\vec{f}_{fr} = -\alpha\vec{v}$ où $\vec{v}$ est la vitesse de la charge et α une constante positive. On suppose que le matériau étudié est placé dans un champ électrique uniforme et constant $\vec{E} = E\vec{e}_x$ (où E = constante). La charge subit alors une force électrique $\vec{f} = q\vec{E}$. On négligera les forces de pesanteur.

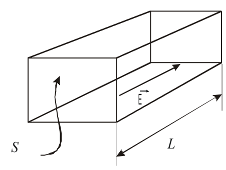
1.1.1 En appliquant la relation fondamentale de la dynamique, déterminer l'équation différentielle vérifiée par la vitesse $\vec{v}$.

1.1.2 Préciser la vitesse limite $\vec{v}_\infty$ atteinte par la charge et le temps caractéristique τ du régime transitoire.

1.1.3 Sachant que le matériau possède n charges mobiles par unité de volume, en déduire le vecteur densité volumique de courant $\vec{j}$ en fonction de n, q, α et $\vec{E}$ lorsque le régime permanent est atteint.

1.1.4 Rappeler la loi d'Ohm locale. En déduire que la conductivité du matériau vaut $\sigma = \frac{nq^2\tau}{m}$.

1.1.5 Montrer que la force $\vec{f} = q\vec{E}$ est une force conservative. Préciser l'expression de l'énergie potentielle E_p. On prendra $E_p(x=0)=0$. En déduire l'expression du potentiel V(x) en fonction de E et x.



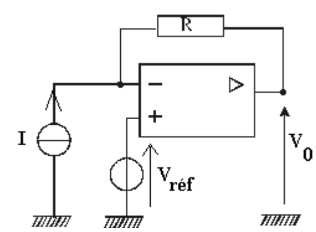
1.1.6 Une portion de ce conducteur de section S et de longueur L est soumise à une différence de potentiel U. En déduire que la résistance R de cette portion vaut $R = \frac{1}{\sigma}.\frac{L}{S}$.

On va maintenant étudier successivement trois montages, qu'on assemblera par la suite.

1.2 Conversion intensité-tension par un montage à amplificateur opérationnel :

L'amplificateur opérationnel est supposé parfait et fonctionne en régime linéaire.

Exprimer la tension de sortie V_0 en fonction de l'intensité du courant I, de la tension $V_{réf}$ et de R.

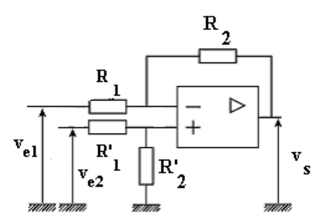


1.3 Montage soustracteur et amplificateur :

L'amplificateur opérationnel est supposé parfait et fonctionne en régime linéaire.

1.3.1 Exprimer la tension v_s en fonction de v_{e1} et v_{e2} ainsi que des différentes résistances.

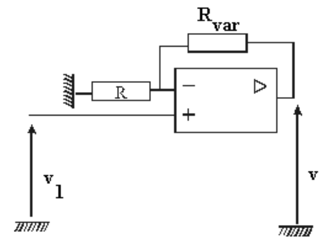
1.3.2 Que se passe-t-il si les quatre résistances sont identiques ?



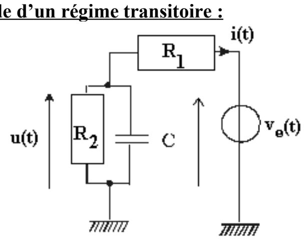
1.3.3 L'amplificateur opérationnel est supposé parfait et fonctionne en régime linéaire.

Déterminer la tension v en fonction de v_1, R et R_{var}.

Donner un nom à ce montage.

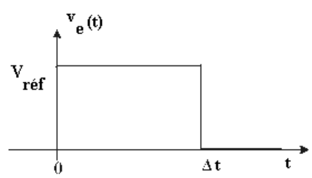


1.4 Étude d'un régime transitoire :



Nous considérons le circuit ci-contre constitué d'un condensateur de capacité C, initialement déchargé, de deux résistances R_1 et R_2, alimenté par un générateur délivrant un signal variable dans le temps $v_e(t)$.

Nous allons appliquer à ce circuit une stimulation d'amplitude $\Delta V = V_{réf} > 0$ et de durée Δt ayant l'allure suivante :



1.4.1.a Exprimer $i\left(t = 0^+\right)$ en fonction de $V_{réf}$ et R_1.

1.4.1.b Exprimer $i\left(t = \Delta t^-\right)$ en fonction de $V_{réf}$, R_1 et R_2. On supposera Δt suffisamment grand pour que le circuit ait atteint un régime permanent à l'instant Δt^-.

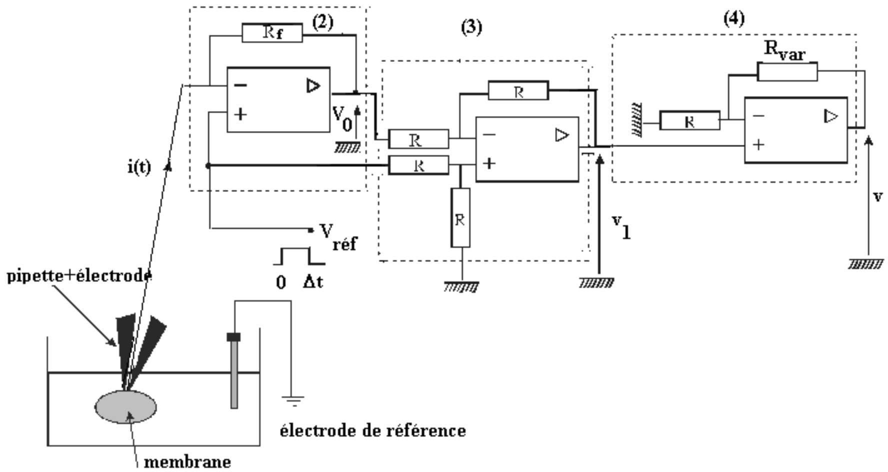
1.4.2 Établir l'équation différentielle vérifiée par u(t) en fonction de R_1, R_2, C et $v_e(t)$. Préciser la constante de temps τ' de ce circuit.

1.4.3 Établir l'expression de u(t) sur l'intervalle de $[0, \Delta t]$.
En supposant $\tau' << \Delta t$, préciser la valeur $u(\Delta t)$.
En déduire $i(t)$ sur l'intervalle $[0,\Delta t]$.

1.4.4 Établir l'expression de u(t) dans l'intervalle $[\,\Delta t^+, +\infty\,[$. En déduire i(t) dans l'intervalle $[\,\Delta t^+, +\infty\,[$.

1.4.5 Tracer l'allure de i(t) dans l'intervalle $[\,\Delta t^+, +\infty\,[$.

II Modèle simplifié de l'amplificateur « *patch clamp* » :



Les techniques de potentiel imposé à une membrane ont pour finalité le maintien du potentiel membranaire d'une cellule ou d'un groupe de cellules à une valeur fixe et l'enregistrement simultané des courants ioniques liés aux transferts d'ions à travers la membrane. Toute mesure nécessite une paire d'électrodes : une électrode de mesure reliée à un convertisseur et une électrode de référence indifférente (généralement une électrode au calomel ou au chlorure d'argent), montées en opposition. La pipette d'enregistrement est un simple tube de verre contenant une solution ionique de composition fixée par l'expérience dans lequel est placée une électrode d'argent chlorurée. L'ensemble permet la conduction électrique entre la membrane cellulaire ou l'intérieur de la cellule et le premier étage de l'amplificateur qui est un convertisseur courant tension (bloc (2)) . Nous donnons ci-dessus le schéma électrique équivalent en configuration cellule entière qui permet l'enregistrement de courants macroscopiques. Le second étage (blocs (3) et (4)) retranche la tension de référence et amplifie le signal d'un facteur compris entre 1 et 200.

2-1 Étude de l'amplificateur :

En utilisant les résultats des questions préliminaires :

2.1.1 Exprimer V_0 en fonction de $V_{réf}$, i(t) et R_f.

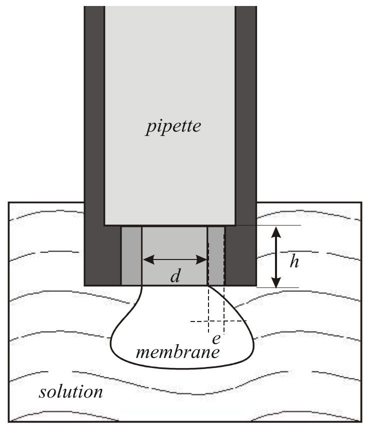
2.1.2 Exprimer v_1 en fonction de $V_{réf}$ et V_0, puis en fonction de i(t) et R_f.

2.1.3 Exprimer v en fonction de i(t), R_f, R et R_{var}.

2-2 Mesure de la résistance de « seal » :

La pipette est modélisable par une résistance R_{pip} de $10M\Omega$. La zone de contact (ZC) entre la pipette et la membrane peut être représentée par un cylindre de diamètre d = 1 µm et de hauteur h = 2 µm, de conductivité $\sigma = 10^{-2}\,\Omega^{-1}.\mathrm{cm}^{-1}$.

2.2.1 En utilisant le résultat de la question 1.1.6, exprimer la résistance d'accès $R_{accès}$ à la membrane en fonction de h, d, et σ. Calculer numériquement $R_{accès}$.



Il se forme de plus une résistance de jonction, ou de fuite, appelée résistance de *seal* conditionnant la stabilité de la liaison pipette membrane. Cette résistance est constituée par une colonne cylindrique entourant la zone ZC, de même conductivité σ que ZC. Cette colonne a l'épaisseur $e = 3.10^{-10}$ m ($e<<d$) et la hauteur h = 2 µm.

2.2.2 Exprimer la résistance de jonction R_{seal} en fonction de h, d, e et σ. Calculer numériquement R_{seal}.

2.2.3 Quel est alors le montage électrique équivalent à l'association de ces trois résistances : R_{pip}, $R_{accès}$ et R_{seal} ? Compte tenu des valeurs numériques, simplifier le montage.

2.3 Mesure en configuration cellule entière :

On modélise par R_1 la résistance équivalente de la pipette précédente et (R_2, C) représente la résistance et la capacité de la membrane (bloc (1) du schéma ci-dessous) :

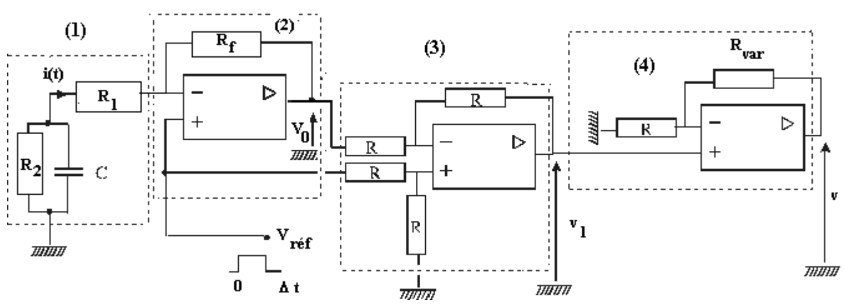
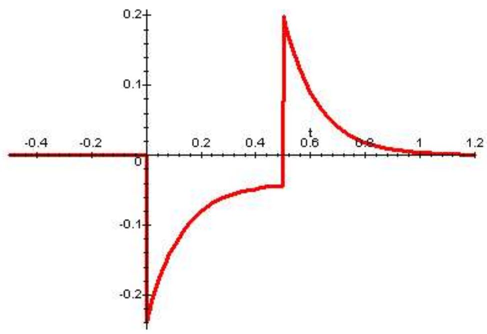


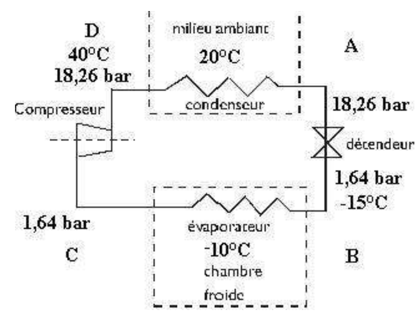
Schéma simplifié du montage

Déduire de l'enregistrement de v(t) donné ci-dessous les valeurs de R_1, R_2 et C. On précise que $V_{réf} = 5$ mV, $R_f = 100$ MΩ et $R_{var} = 0$. Sur cet enregistrement, l'abscisse t est en secondes et l'ordonnée v est en volts.



Problème 2 : Étude d'un réfrigérateur

Nous nous proposons d'étudier un réfrigérateur dont le schéma est représenté ci-contre. Le système contient une quantité donnée de fluide, le "R134a" ou 1,1,1,2-tétrafluorométhane CF_3-CH_2F qui n'attaque pas la couche d'ozone. Le circuit est fermé et subit une série de transformations cycliques :



- Le fluide qui sort du condenseur sous forme liquide saturant (A) à la pression de 18,26 bar est ramené à la pression de 1,64 bar dans le détendeur (B). La détente (AB) est du type de Joule-Kelvin.
- Dans l'évaporateur, le fluide se vaporise partiellement à pression et température constante en recevant un transfert thermique de la source froide de température $T_f = 263$ K (transformation BC)
- Le fluide subit ensuite une compression dans un compresseur calorifugé. La compression (CD) est isentropique de 1,64 bar jusqu'à la pression de 18,26 bar.
- Dans le condenseur, le fluide se condense totalement en fournissant la chaleur à l'extérieur (la cuisine par exemple). L'air est à environ à 293 K. La pression saturante est alors de 18,26 bar et la température du fluide est $T_A = 313$ K.

On suppose que les conduites reliant les différents éléments sont calorifugées et que la pression qui y règne est constante. On négligera toutes les variations de vitesse du fluide et **on raisonnera sur 1 kg du fluide**.

Données :

pression de vapeur saturante (bar)	température de changement d'état (K)	enthalpie massique du liquide ($kJ \cdot kg^{-1}$)	enthalpie massique de la vapeur ($kJ \cdot kg^{-1}$)	entropie massique du liquide ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	entropie massique de la vapeur ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
P_1 = 1,64	T_1=258 K	h_{1L}=178,2	h_{1V}=360,4	s_{1L}=_________	s_{1V}=730
P_2 = 18,26	T_2=313 K	h_{2L}=264,1	h_{2V}=387,7	s_{2L}=_________	s_{2V}=680

I . Préliminaire :

1.1 Tracer l'allure du diagramme de Clapeyron (pression en ordonnée et volume massique en abscisse) pour un changement d'état en faisant apparaître les deux isothermes T_1=258 K et T_2=313 K ainsi que les pressions correspondantes P_1 et P_2.

1.2 Déterminer la chaleur latente L_1 de changement d'état à la température T_1=258 K et la chaleur latente L_2 de changement d'état à la température T_2=313 K.

1.3 Préciser la relation entre les enthalpies et entropies massiques lors d'un changement d'état. Compléter le tableau donné plus haut.

1.4 Montrer, en définissant soigneusement le système choisi, que la variation d'enthalpie massique h du fluide, à la traversée d'un système, est donnée en régime stationnaire par $\Delta h = W^* + Q$ où W^* représente le travail massique autre que celui des forces pressantes reçu par le fluide de la part des parties mobiles du système et Q représente le transfert thermique massique reçu par le fluide.

1.5 Montrer que l'expression de l'enthalpie massique h(x,T) d'un fluide diphasé (liquide, vapeur) en fonction de l'enthalpie massique de la phase liquide $h_L(T)$, de l'enthalpie massique de la phase vapeur $h_V(T)$ ainsi que du titre massique en vapeur x s'écrit : $h(x,T) = h_L(T) + x(h_V(T) - h_L(T))$.

1.6 Établir l'expression de l'entropie massique s(x,T) d'un fluide diphasé (liquide, vapeur) en fonction de l'entropie massique de la phase liquide en équilibre avec la vapeur $s_L(T)$, de l'entropie massique de la phase vapeur en équilibre avec le liquide $s_V(T)$ ainsi que du titre massique en vapeur x.

II. Étude du compresseur :

Le fluide subit dans le compresseur une compression adiabatique et réversible.

2.1 À la sortie du compresseur, le fluide est une vapeur saturante à la température T_2=313 K. En déduire le titre massique en vapeur x(C) au début de la compression à la température T_1=258 K.

2.2 Préciser l'expression de l'enthalpie massique au début et à la fin de la compression.

2.3 En utilisant le résultat de la question 1.4, calculer littéralement puis numériquement le travail W^* fourni par le compresseur.

III. Étude du condenseur :

Dans le condenseur, le fluide est totalement liquéfié à la température T_2=313 K et à la pression P_2 = 18,26 bar.

3.1 Calculer littéralement et numériquement le transfert thermique Q_{ch} reçu de la part de l'air ambiant, de température T_{ch} = 293 K. Justifier son signe.

3.2 Calculer littéralement puis numériquement la variation d'entropie, l'entropie échangée et l'entropie créée lors de la condensation.

IV. Étude du détendeur :

Dans un détendeur parfaitement calorifugé et ne comportant pas de pièce mobile, le fluide subit une détente de Joule-Kelvin jusqu'à la pression P_1, détente au cours de laquelle une partie du fluide se vaporise.

4.1 Justifier que la détente est isenthalpique.

4.2 En déduire le titre massique en vapeur x(B) à la fin de la détente à la température T_1=258 K.

4.3 En déduire l'entropie créée dans le détendeur.

V. Étude de l'évaporateur :

5.1 Calculer littéralement et numériquement le transfert thermique Q_{fr} reçu de la part de la chambre froide, de température T_{fr} = 263 K. Justifier le signe de Q_{fr}.

5.2 Calculer littéralement puis numériquement la variation d'entropie, l'entropie échangée et l'entropie créée dans l'échangeur.

VI. Bilan :

6.1 Tracer le cycle dans le diagramme de Clapeyron.

6.2 Définir l'efficacité d'un réfrigérateur. Calculer numériquement cette efficacité.

6.3 Établir l'expression de l'efficacité théorique maximale d'un réfrigérateur en fonction des températures T_1=258 K et T_2=313 K. Comparer cette efficacité à celle calculée précédemment. Conclure.

6.4 Calculer l'entropie créée sur un cycle.

6.5 Justifier le choix des valeurs T_1=258 K et T_2=313 K pour ce cycle.

FIN