

## ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

### ELE2302 : CIRCUITS ÉLECTRONIQUES

### SOLUTIONNAIRE CONTRÔLE MI-SESSION

**Cours : Circuits électroniques**

**Sigle : ELE2302**

**Date : 27 février 2006**

**Heure : 9h30-11h30**

#### **Notes :**

1. Documentation : Feuilles manuscrites autorisées.
2. Calculatrice autorisée.
3. Nombre de pages : 8 (à vérifier avant de commencer à répondre aux questions).
4. Justification des réponses : les réponses non justifiées seront considérées incomplètes.
5. Justification des calculs : pour les applications numériques, les résultats balancés sans explication ne seront pas pris en compte.

#### **Conseils :**

1. Lire tous les exercices avant de commencer à répondre aux questions.
2. Bien répartir votre temps en fonction du barème.
3. Pour les calculs numériques, faire toujours le calcul analytique en entier avant de remplacer par les valeurs numériques.

## Constantes utiles :

- ♦ Charge d'un électron :  $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- ♦ Constante de Boltzman :  $k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K} = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J}$
- ♦ Conversion de température :  $T (^{\circ}\text{C}) = T (\text{K}) - 273$
- ♦ Constante de Plank :  $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
- ♦ Concentration intrinsèque pour le silicium :  $n_i = 1.5 \cdot 10^{10}$  (pour la température ambiante)
- ♦ Mobilité des électrons  $\mu_n = 1425 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  (pour le silicium dopé)
- ♦ Mobilité des trous  $\mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ . (pour le silicium dopé)

## 1. Exercice 1 (4 pts)

Pour cet exercice, on suppose que toutes les diodes sont **idéales**.

- 1.1 Utiliser le théorème de Thévenin pour simplifier les circuits de la Figure 1-1 et calculer les courants  $I$  et les tensions  $V$ .

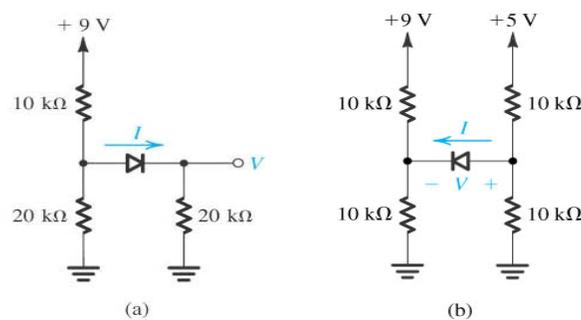
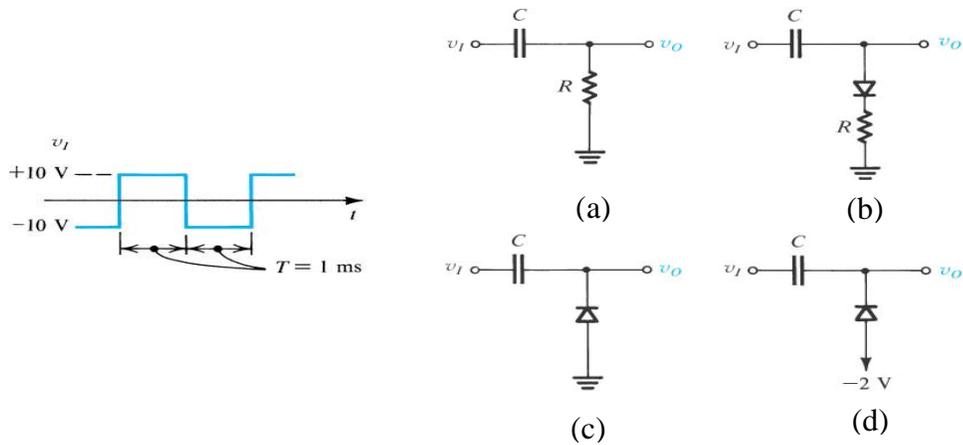


Figure 1-1

a)  $R_{th} = 20/10 = 6.66k$  ;  $V_{th} = (20/30) \cdot 9 = 6V$  ;  
Diode ON :  $I = 6/26.66 = 0.225mA$  et  $V = 20 \cdot 0.225 = 4.5V$

b)  $V_{th1} = 4.5V$  ;  $V_{th2} = 2.5V \Rightarrow$  Diode OFF  
 $I = 0$  et  $V = V_{th2} - V_{th1} = -2V$

- 1.2 Pour le signal  $v_i$  donné dans la Figure 1-2, tracer l'allure de la tension  $v_o$  pour les différents circuits de la figure et indiquer les valeurs crêtes sur la courbe. On suppose qu'on a  $RC \gg T$ .

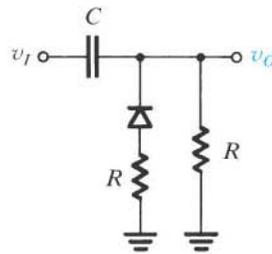


**Figure 1-2**

*v<sub>i</sub> est un signal carré entre -10 et +10V et v<sub>o</sub>=v<sub>i</sub>-v<sub>c</sub>*

- a) v<sub>i</sub> est un signal carré entre -10 et +10V.*
- b) v<sub>o</sub> est un signal carré entre 0 et -20V.*
- c) v<sub>o</sub> est un signal carré entre 0 et +20V.*
- d) v<sub>o</sub> est un signal carré entre -2 et +18V.*

1.3 Même question pour le circuit de la Figure 1-3 (indice : la capacité se charge à travers les deux résistances R en parallèle et se décharge à travers un seule résistance R).

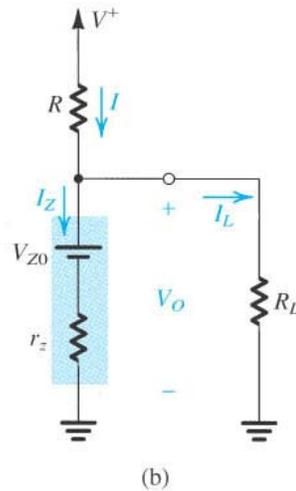


**Figure 1-3**

*Comme la vitesse de charge est deux fois plus élevée que la vitesse de décharge, la tension aux borne de la capacité est deux fois plus grande pendant l'alternance négative que pendant l'alternance positive et comme on a v<sub>o</sub>=v<sub>i</sub>-v<sub>c</sub>, alors la tension crête de v<sub>o</sub> est deux fois plus grande pendant l'alternance positive que pendant l'alternance négative. La sortie v<sub>o</sub> est un signal carré entre -(1/3)10 et +(2/3)10V.*

## 2. Exercice 2 (7 pts)

On considère le régulateur de tension de la Figure 2-1 utilisé pour réguler une tension  $V^+$  susceptible de varier entre 40V et 60V. La diode Zener utilisée a une tension  $V_{Z0}=45V$ . Pour les 5 premières questions, on suppose que la résistance dynamique de diode  $R_Z$  est négligeable ( $R_Z = 0$ ). On suppose aussi que  $R_L = 1.8 \text{ k}\Omega$ .



**Figure 2-1**

2.1 Quelle est la valeur de  $R$  si pour  $V^+=40V$ , on mesure un courant  $I_L=20 \text{ mA}$  ?

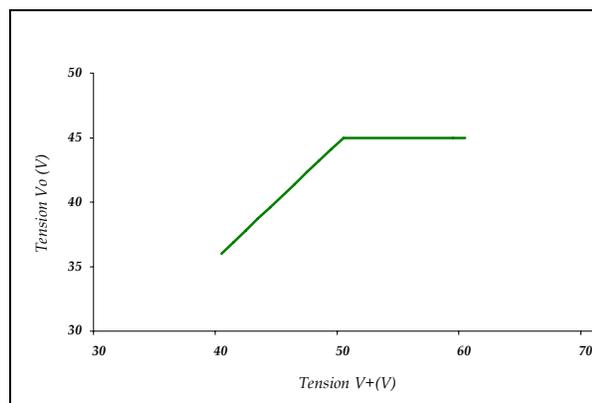
*Pour  $V^+=40V$ , la diode Zener est bloquée. On a donc :  
 $I_Z = 0$  et  $I = I_L = V^+ / (R + R_L) = 20 \text{ mA} \implies R + R_L = V^+ / I_L = 40 \text{ k}\Omega$   
 Donc  $R = 200 \Omega$*

2.2 Pour la suite des questions, on suppose que  $R=200\Omega$ . À partir de quelle valeur de  $V^+$ , la tension de sortie  $V_o$  est-elle régulée ?

*La tension  $V_o$  commence à être régulée lorsque  $V_o$  devient égale à 45V et donc :  
 $I_L = V_o / R_L = 45 / 1800 = 25 \text{ mA}$   
 $V^+ = I_L * (R + R_L) = 0.025 * 2000 = 50V$*

2.3 Tracer la courbe de la fonction de transfert  $V_o=f(V^+)$  pour  $40V < V^+ < 60V$ .

*Pour  $40 < V^+ < 50$  :  $V_o = 0.9 * V^+$  (droite entre les deux points (40,36) et (50,45))  
 Pour  $50 < V^+ < 60$  :  $V_o = 50V$*



2.4 Calculer le courant  $I_Z$  pour  $V^+=60V$  ?

On a :  $I_L = V_0 / R_L = 45/1800 = 25 \text{ mA}$

$$I = (V^+ - V_0) / R = 15/200 = 75 \text{ mA}$$

$$I_Z = I - I_L = 75 - 25 = 50 \text{ mA}$$

2.5 Si la diode a une puissance maximum de 9W, quelle est la tension  $V^+$  maximum qu'on peut appliquer sans endommager la diode ?

$$I_{Zmax} = 9/45 = 0.2 \text{ A} \implies I_{max} = 0.2 + 0.025 = 0.225 \text{ A} = (V^+_{max} - 45) / 200$$

$$\implies V^+_{max} = 200 * 0.225 + 45 = 90 \text{ V}$$

2.6 Pour les questions suivantes on suppose  $R_Z = 50\Omega$ . Calculer la résistance interne

$$r_i = \left| \frac{\Delta V_0}{\Delta I_L} \right| \text{ pour } V^+ \text{ constant.}$$

Il faut exprimer  $V_0$  en fonction de  $V^+$  et  $I_L$ .

On a :  $V^+ = V_0 + R * I$

$$V_0 = V_{Z0} + I_Z * R_Z = R_L * I_L$$

$$I = I_Z + I_L$$

$$\implies V_0 = V^+ - R (I_Z + I_L) = V^+ - R ((V_0 - V_{Z0}) / R_Z + I_L)$$

$$\implies V_0 (1 + R/R_Z) = V^+ + R * V_{Z0} / R_Z - R I_L$$

Pour  $V^+$  constant, on a :

$$\Delta V_0 (1 + R/R_Z) = -R \Delta I_L \implies \left| \frac{\Delta V_0}{\Delta I_L} \right| = \frac{R R_Z}{R + R_Z} = 40 \Omega$$

2.7 Calculer le coefficient de régulation  $K = \left| \frac{\Delta V_0}{\Delta V^+} \right|$  pour  $I_L$  constant.

On a :  $V_0 (1 + R/R_Z) = V^+ + R * V_{Z0} / R_Z - R I_L$

Pour  $I_L$  constant, on a :

$$\Delta V_0 (1 + R/R_Z) = \Delta V^+ \implies \left| \frac{\Delta V_0}{\Delta V^+} \right| = \frac{R_Z}{R + R_Z} = 0.2$$

### 3. Exercice 3(2pt)

Soit un silicium dopé N ayant une résistivité de  $0.1 \Omega \text{ cm}$ .

3.1 Expliquer le principe de base du dopage des semi-conducteurs.

*C'est le processus qui permet de modifier la concentration des électrons libres ou des trous dans un semi-conducteur intrinsèque en ajoutant des atomes de valence 5 pour le dopage N (ajout d'électrons) et des atomes de valence 3 pour le dopage P (ajout de trous).*

3.2 Quelle est la conductivité du silicium dopé ?

*Conductivité  $\sigma = 1/\text{résistivité} = 10 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$*

3.3 Dédire la concentration des électrons et des trous dans le silicium dopé.

*Soit  $n_n$  et  $p_n$  la concentration des électrons et des trous, respectivement. On a :*

$$\sigma = e(n_n \mu_n + p_n \mu_p) \approx en_n \mu_n$$

$$\Rightarrow n_n = \frac{\sigma}{e \mu_n} = \frac{10}{1.6 * 10^{-19} * 1425} = 4.39 * 10^{16} \text{ electrons / cm}^3$$

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{1.5^2 * 10^{20}}{4.39 * 10^{16}} = 5.12 * 10^3 \text{ trous / cm}^3$$

#### 4. Exercice 4 (3,5 pts)

Répondre brièvement aux questions suivantes :

4.1 Quelles sont les charges qui se déplacent dans une jonction pn les électrons ou les trous ?

*Les deux.*

4.2 Quelles sont les charges qui se déplacent dans un conducteur : les électrons ou les trous ?

*Les électrons.*

4.3 Expliquer ce qui se passe lorsque les trous qui se déplacent dans un semi-conducteur atteignent le conducteur (métal).

*Ils se recombinent avec les électrons qui entrent dans le semi-conducteur.*

4.4 Expliquer la notion de porteurs majoritaires et minoritaires dans une jonction pn.

*Les porteurs majoritaires sont les porteurs avec une très grande concentration (électrons pour le dopage N et trous pour le dopage P). Les porteurs minoritaires sont les porteurs avec une très faible concentration (trous pour le dopage N et électrons pour le dopage P).*

4.5 Quelle est la charge globale d'un semi-conducteur dopé N ?

*Le semi-conducteur dopé reste neutre.*

4.6 Qu'est-ce qui crée le déplacement des porteurs dans un conducteur ?

*Champ électrique*

4.7 Qu'est-ce qui crée le déplacement des porteurs dans une jonction pn ?

*1) Champ électrique*

*2) Différence de concentration des porteurs*

#### 5. Exercice 5 (3,5 pts)

Soit le régulateur simple alternance de la Figure 5-1 qui utilise une diode ayant  $V_{DO}=0,7V$  et une résistance  $R_D$  négligeable devant  $R$  et une résistance  $R=100\Omega$ . On suppose que le signal d'entrée  $v_i$  est un signal en dent de scie qui varie entre  $-1V$  et  $+5V$  et qui a une période  $T=1ms$  (voir Figure 5-2).

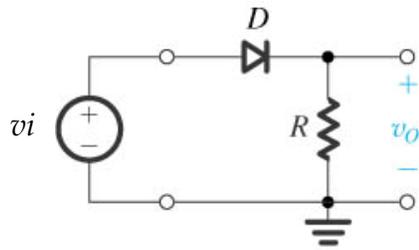


Figure 5-1

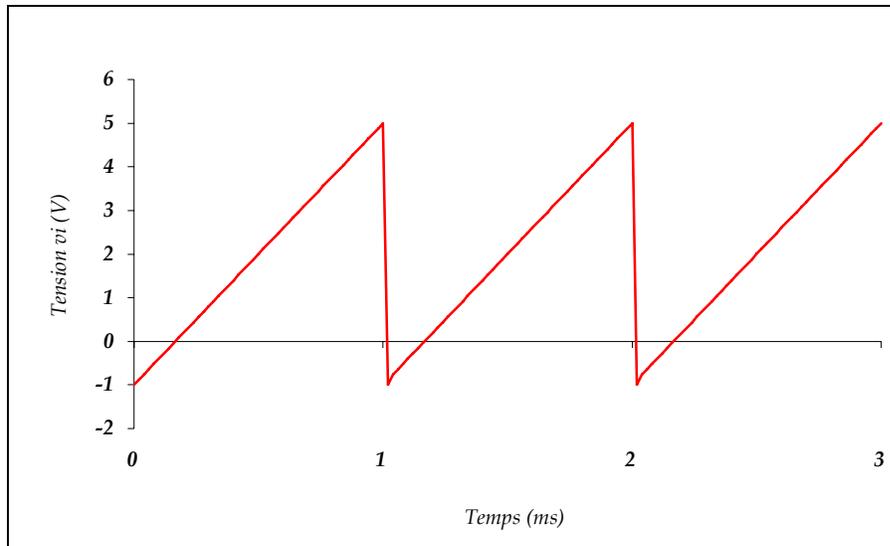


Figure 5-2

5.1 Donner l'équation de la fonction  $v_i$  en fonction de  $t$  pour  $0 < t < 2T$ .

Pour  $0 < t < T$  :  $v_i(t) = 6t - 1$

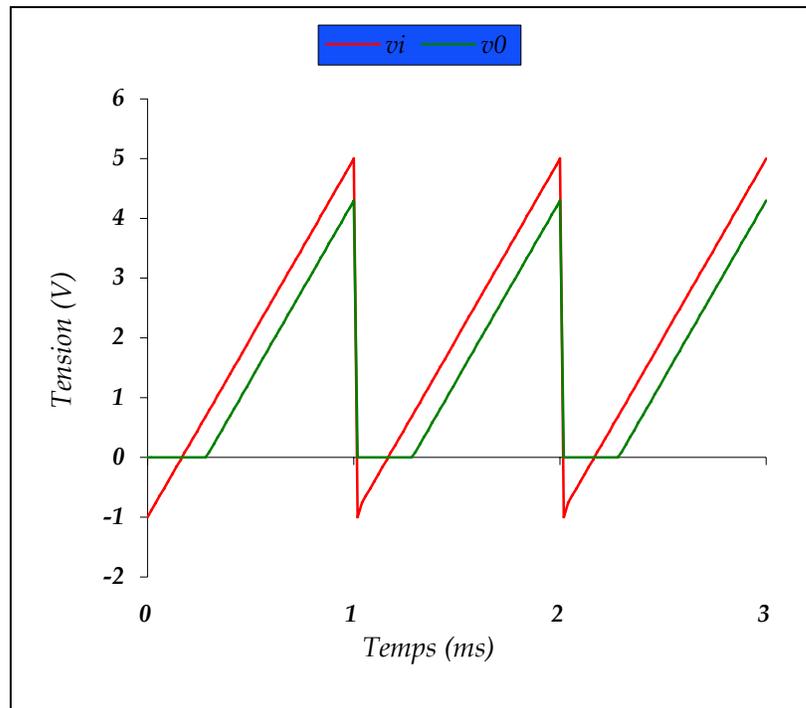
Pour  $T < t < 2T$  :  $v_i(t) = 6(t - T) - 1$

5.2 Quelle est la valeur moyenne du signal d'entrée ?

$$v_{i_{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T v_i(t) dt = \int_0^1 (6t - 1) dt = \frac{6}{2} - 1 = 2V$$

5.3 Tracer sur le même graphique la tension  $v_i$  et la tension  $v_o$  aux bornes de la résistance  $R$ .

On a :  $v_o = v_i - V_{DO}$  pour  $(v_i > V_{DO})$



5.4 Calculer le pourcentage de conduction de la diode.

*On a :  $v_o = v_i - V_{DO}$  pour  $(v_i > V_{DO})$*

*La diode conduit pour  $v_i > V_{DO} \implies 6t - 1 > 0.7 \implies t > 1.7/6 = 0.28 \text{ ms}$*

*Le pourcentage de conduction de la diode  $P = (1 - 0.28)/T = 0.72 = 72 \%$*

5.5 Calculer le courant maximum traversant la diode (mode directe) et la tension inverse maximum (PIV) aux bornes de la diode (mode inverse).

*Courant maximum  $= (5 - 0.7)/100 = 43 \text{ mA}$*

*PIV  $= (0 - (-1)) = 1 \text{ V}$*

5.6 Calculer la valeur moyenne de la tension  $v_o$ .

*On a :  $v_o = v_i - V_{DO} = 6t - 1.7$  pour  $(0.28 < t < 1)$*

*Donc :  $v_o = 0$  pour  $0 < t < 0.28$*

*$= 6t - 1.7 = 6(t - 0.28)$  pour  $0.28 < t < 1$*

$$v_{o_{\text{moy}}} = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \int_{0.28}^1 6(t - 0.28) dt = \frac{6}{2} 0.72^2 = 1.5 \text{ V}$$

*Autre méthode :  $v_{o_{\text{moy}}} = (1/T) * (\text{aire sous la courbe de } v_o) = 0.5 * (1 - 0.28) * 4.3 = 1.5 \text{ V}$*

5.7 Que faut-il faire pour obtenir une tension de sortie  $v_o$  presque constante et proche de la valeur crête de  $v_i$ .

*Ajouter un capacité  $C$  en parallèle avec la résistance  $R$  avec la condition  $RC \gg T$ .*

**Bon examen !**