**École Nationale des Sciences Appliquées de Tanger**

**Université Abdelmalek Essaadi**

---

## CORRECTION TD N$^{o}$3 : Les Diodes à semi-conducteur

---

**Eléments Électronique-AP2** **2016-2017**

**Excercice 1:**

À partir de la *loi d'action de masse* ($n_i^2 = n\,p$):

$$\text{n=p=n}_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2\,kT}\right) \tag{1}$$

Avec:

$$N_C = 3.10^{19}\left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}} \text{ atomes/cm}^{-3} \qquad N_V = 10^{19}\left(\frac{T}{300}\right)^{\frac{3}{2}} \text{ atomes/cm}^{-3}$$

1. $E_G = 1.1eV$ et à T=300 K on trouve $N_C = 3.10^{19}$ et $N_V = 10^{19}$ alors que $n_i = 1,0167.10^{10}cm^{-3}$
2. Pour déterminer la concentration des impureté introduites il chercher le volume,$V_{Sb}$ occupé par $5.10^{12}$ atomes d'antimoine (Sb)

$$\text{La masse de } 5.10^{12}\text{de Sb} = \frac{5.10^{12}}{N_A}.\text{Masse atomique}$$
$$\text{Soit} = 2,3322\,10^{-10}\text{ g}$$
$$\text{Le volume de Sb rechércher} = \text{masse de } 5.10^{12}\text{de Sb}/\text{ masse volumique de Sb(g.cm}^{-3})$$
$$\text{Soit} \approx 1,001\,10^{-10}\,\text{cm}^3$$
$$\text{la concentration du dopant est } N_D = \frac{1}{1.10^{-10}} = 1.10^{10}\text{cm}^{-3}$$

L'antimoine (Sb) appartient à la 5$^{\text{ième}}$ colonne de tableau période; donc il s'agit d'un donneur. Ainsi le semi-conducteur obtenu est de type N.

3. Pour établir les expressions générales donnant les concentrations n et p supposons le silicium a subit un dopage de type N suivie d'un dopage de type P. Les concentrations des dopants respectives sont $N_D$ et $N_A$.
Après ces deux opérations, les populations en électrons et trous libres sont liés par la loi d'action de masse:

$$n.p = n_i^2 \tag{2}$$

Outre la neutralité électrique du cristal conduit à la relation:

$$q(p + N_D) = q(n + N_A) \tag{3}$$

Les équations 2 et 3 permet d'obtenir l'équation de deuxième degré n en :

$$\mathrm{n}^2 - (\mathrm{N_D} - \mathrm{N_A})\mathrm{n} - \mathrm{n_i^2} = 0 \tag{4}$$

La résolution de 4 et le rejet de la solution négative permet:

$$\mathrm{n} = \frac{(\mathrm{N_D} - \mathrm{N_A}) + \sqrt{(\mathrm{N_D} - \mathrm{N_A})^2 + 4\mathrm{n_i^2}}}{2} \tag{5}$$

$$\text{De mêmê:} \quad \mathrm{p} = \frac{-(\mathrm{N_D} - \mathrm{N_A}) + \sqrt{(\mathrm{N_D} - \mathrm{N_A})^2 + 4\mathrm{n_i^2}}}{2} \tag{6}$$

$$\text{soit:} \quad \mathrm{n} = 1,6180\,10^{10}\,\mathrm{cm^{-3}} \quad \mathrm{p} = 6,1803\,10^{9}\,\mathrm{cm^{-3}}$$

4. Il faut chercher T tel-que:

$$\mathrm{n_i} > 10\,\mathrm{N_D} \Rightarrow \mathrm{n_i^2} > 100\,\mathrm{N_D^2}$$

$$(\mathrm{N_C N_V})\exp\left(-\frac{\mathrm{E_G}}{\mathrm{kT}}\right) > 100\,\mathrm{N_D^2}$$

$$\text{soit} \quad 3\,(10^{19})^2\left(\frac{T}{300}\right)^3 \exp\left(-\frac{\mathrm{E_G}}{\mathrm{kT}}\right) > 100\,\mathrm{N_D^2}$$

$$\mathrm{T}\exp\left(-\frac{\mathrm{E_G}}{\mathrm{3kT}}\right) > 9,65\,10^{-4}$$

Pour T=333,3 K $\mathrm{T}\exp\left(-\frac{\mathrm{E_G}}{\mathrm{3kT}}\right) = 9,6262\,10^{-4}$ et pour T=333,4 K $\exp\left(-\frac{\mathrm{E_G}}{\mathrm{3kT}}\right) = 9,6660\,10^{-4}$
$\Rightarrow$ il faut chauffer le barreau à T>333,4 K.

**Excercice 2:**

Étude de la conductivité d'un semi-conducteur extrinsèque

1. L'Arsenic (As) appartient la 5$^{\text{ième}}$ colonne de tableau période; donc il s'agit d'un donneur. Ainsi le semi-conducteur obtenu est de type N.
   Un raisonnement pareil que celui de l'exercice 1 permet de trouver:

$$\mathrm{n_0} \approx \mathrm{N_D} = \frac{1}{\text{volume de Ge}} = \frac{\mathrm{N_A}\rho}{\mathrm{n_G M_A}} = 4,411\,10^{16}\,\mathrm{cm^{-3}}$$
$$\mathrm{n_0} = \frac{\mathrm{n_i^2}}{\mathrm{n_0}} = 1,417\,10^{10}\,\mathrm{cm^{-3}}$$

2. La conductivité du cristal avec dopage est de:

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) = 1,6\,10^{-19}.(4,411\,10^{16}.3900 + 1,417\,10^{10}.1900)$$
$$= 27,525\Omega^{-1}\,\mathrm{cm^{-1}} \Rightarrow \rho = \frac{1}{\sigma} = 0,0363\,\Omega\,\mathrm{cm}$$

   La conductivité du cristal sans dopage est de:

$$\sigma = e(n_i\mu_n + n_i\mu_p) = 1,6\,10^{-19}.2,5\,10^{13}.(3900 + 1900)$$
$$= 0,0232\Omega^{-1}\,\mathrm{cm^{-1}} \Rightarrow \rho = \frac{1}{\sigma} = 43,1034\,\Omega\,\mathrm{cm}$$

   La résistivité du semi-conducteur a complètement changer par l'introduction du dopant.

3. Le courant I est donné par:

$$\mathrm{I} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{R}} = \frac{\mathrm{VS}}{\rho l} = \frac{0,5.1,2\,10^{-2}}{0,0363.1,3} = 0,1271\,\mathrm{A}$$

Quant à la densité du courant:

$$\mathrm{J} = \frac{\mathrm{I}}{\mathrm{S}} = \frac{0.1271}{1,2\,10^{-2}} = 9,5\,\mathrm{Acm}^{-2}$$

**Excercice 3:**

On suppose que la diode est idéale ($1^{\text{ière}}$ approximation) voir figure 1:

1. Recherche de condition de blocage de la diode:
   la diode bloquée $\Rightarrow \mathrm{V_D} < 0$ et $\mathrm{I_D} = 0$

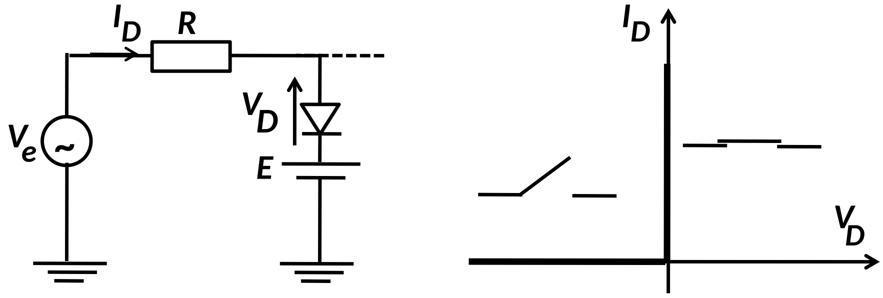


Figure 1: Tension et courant de la diode supposée idéale

$$\text{La loi des maille:}\quad \mathrm{V_e} = \mathrm{RI_D} + \mathrm{V_D} + \mathrm{E}$$
$$\text{La diode étant bloquée ID=0} \Rightarrow \mathrm{V_e} = \mathrm{V_D} + \mathrm{E} \quad \text{et } \mathrm{V_D} = \mathrm{V_e} - \mathrm{E}$$
$$\text{L'autre condition de blocage VD<0} \Rightarrow \mathrm{V_e} < \mathrm{E}$$

Donc sous la condition $\mathrm{V_e} < \mathrm{E}$ la diode est bloquée et le montage est équivalent à la figure 2 -a). Alors:

$$\mathrm{V_s} = \mathrm{V_e}$$

Recherche de condition de conduction de la diode:
La diode est passante $\Rightarrow \mathrm{V_D} = 0$ et $\mathrm{I_D} \geq 0$

$$\text{Toujour la loi des maille:}\quad \mathrm{V_e} = \mathrm{RI_D} + \mathrm{V_D} + \mathrm{E}$$
$$\text{La diode étant passante VD=0} \Rightarrow \mathrm{V_e} = \mathrm{RI_D} + \mathrm{E} \quad \text{et } \mathrm{I_D} = \frac{\mathrm{V_e} - \mathrm{E}}{\mathrm{R}}$$
$$\text{L'autre condition de conduction ID}\geq 0 \Rightarrow \mathrm{V_e} \geq \mathrm{E}$$

Donc sous la condition $\mathrm{V_e} \geq \mathrm{E}$ la diode est passante et le montage est équivalent à la figure 2 -b). Alors:

$$\mathrm{V_s} = \mathrm{E}$$

D'après l'étude précédente on peut distinguer les cas suivants:
- $\mathrm{E_M} < \mathrm{E}$ la diode est toujours bloquée; la tension $\mathrm{V_s} = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 3 a).
- $\mathrm{E_M} \geq \mathrm{E}$ la tension $\mathrm{V_s} = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 3 b).

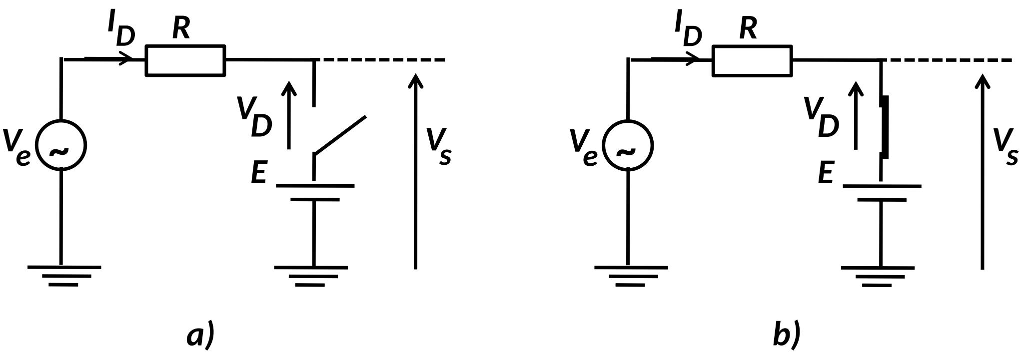


Figure 2: Montage équivalent pour la diode bloquée a) et la diode passante b)

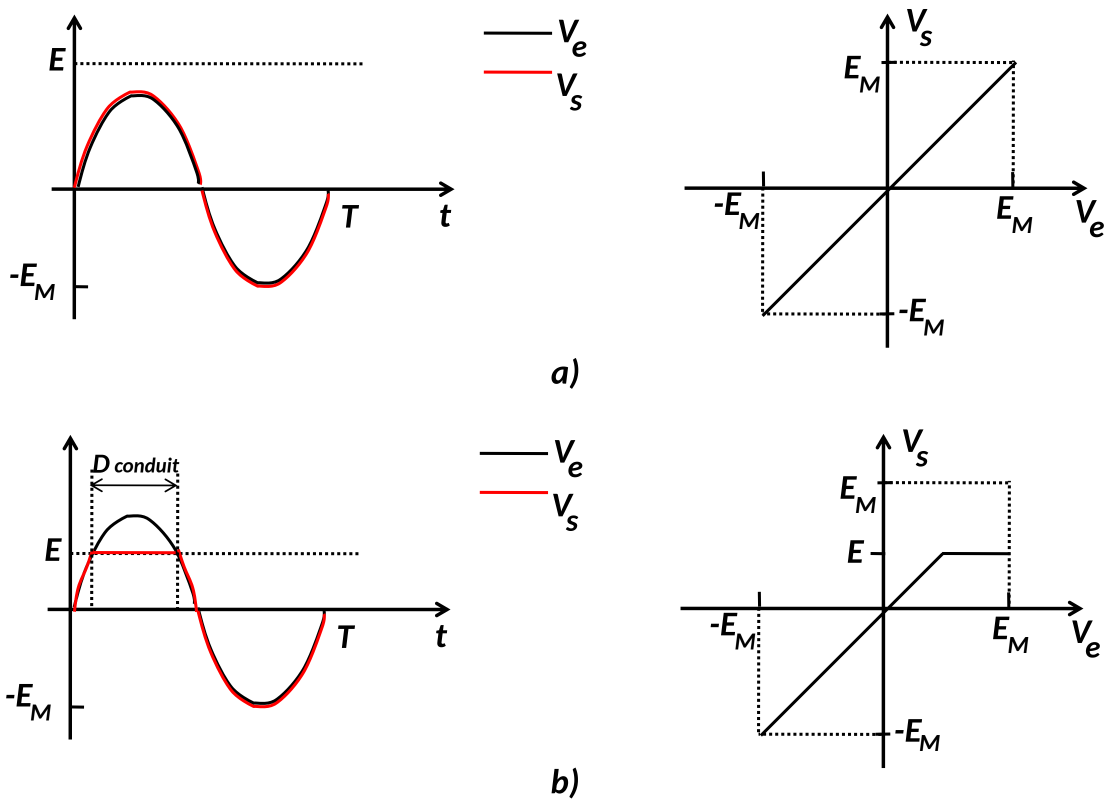


Figure 3: La tension de sortie et la caractéristique de transfert a) $E_M < E$ et b) $E_M \geq E$

2. Étude sous l'hypothèse de diode ($2^{\text{ième}}$ approximation):
   Recherche de condition de blocage de la diode:
   la diode bloquée $\Rightarrow V_D < V_{seuil}$ et $I_D = 0$

La loi des maille: $V_e = RI_D + V_D + E$

La diode étant bloquée ID=0 $\Rightarrow V_e = V_D + E$ et $V_D = V_e - E$

L'autre condition de blocage VD $< V_{seuil} \Rightarrow V_e < E + V_{seuil}$

Donc sous la condition $V_e < E + V_{seuil}$ la diode est bloquée et elle est équivalent à un interrupteur ouvert en série avec le générateur de tension $V_{seuil}$ -voir figure 4 a)-alors:

$$V_s = V_e$$

<u>Recherche de condition de conduction de la diode:</u>
la diode conduit $\Rightarrow V_D = V_{seuil}$ et $I_D \geq 0$

La loi des maille: $V_e = RI_D + V_D + E$

La diode étant passante VD=Vseuil $\Rightarrow V_e = RI_D + V_{seuil} + E$ et $I_D = \dfrac{V_e - (E + V_{seuil})}{R}$

L'autre condition de conduction ID$\geq$0 $\Rightarrow V_e \geq E + V_{seuil}$

Donc sous la condition $V_e \geq E + V_{seuil}$ la diode est passante et elle est équivalent à un interrupteur fermé en série avec le générateur de tension $V_{seuil}$ -voir figure 4- b) alors:

$$V_s = E + V_{seuil}$$

D'après l'étude précédente on peut distinguer les cas suivants:

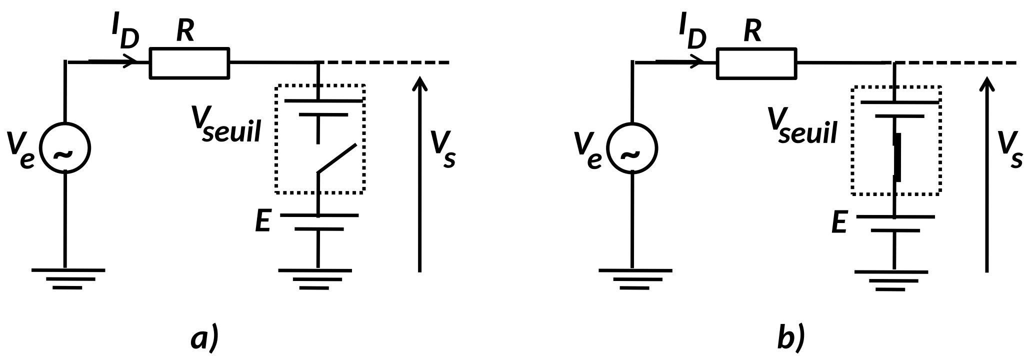


Figure 4: Montage équivalent (2ième approximation) D bloquée a) et D passante b)

- $E_M < E + V_{seuil}$ la diode est toujours bloquée; la tension $V_s = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 5 a).
- $E_M \geq E + V_{seuil}$ la tension $V_s = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 5 b).

3. Étude sous l'hypothèse de diode (3ième approximation):
   <u>Recherche de condition de blocage de la diode:</u>
   la diode bloquée $\Rightarrow V_D < V_{seuil}$ et $I_D = 0$

La loi des maille: $V_e = RI_D + V_D + E$

La diode étant bloquée ID=0 $\Rightarrow V_e = V_D + E$ et $V_D = V_e - E$

L'autre condition de blocage VD $< V_{seuil} \Rightarrow V_e < E + V_{seuil}$

Donc sous la condition $V_e < E + V_{seuil}$ la diode est bloquée et le montage devient:-voir figure 6 a)-alors:

$$V_s = V_e$$

<u>Recherche de condition de conduction de la diode:</u>

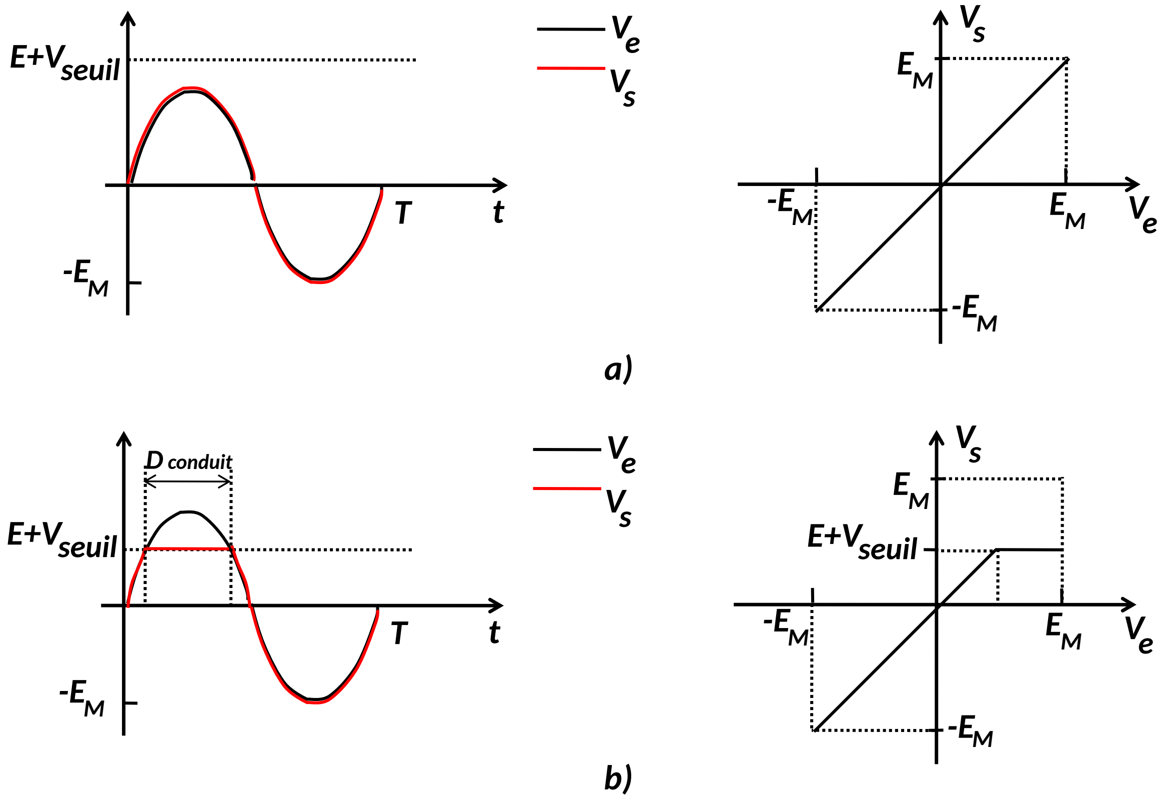


Figure 5: La tension de sortie et la caractéristique de transfert a) $E_M < E + V_{seuil}$ et b) $E_M \geq E + V_{seuil}$

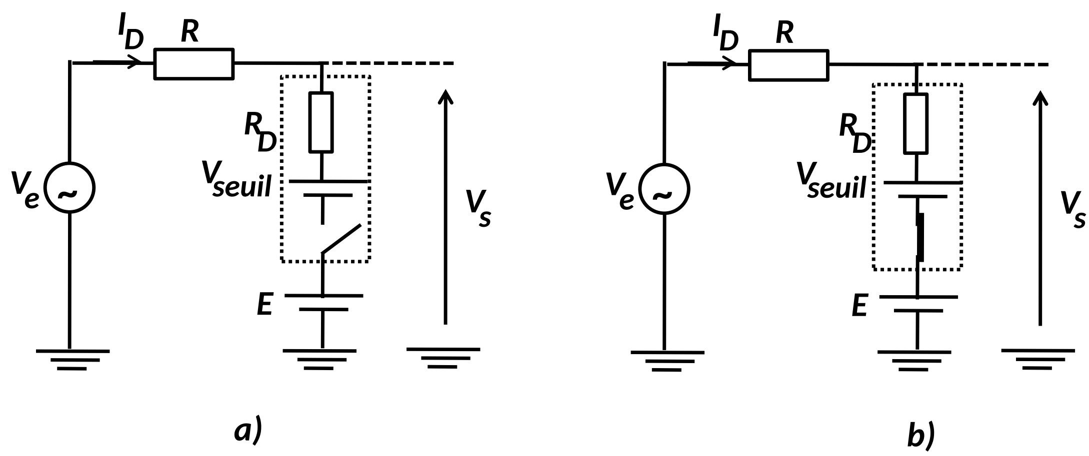


Figure 6: Montage équivalent (3ième approximation) D bloquée a) et D passante b)

la diode conduit $\Rightarrow V_D \geq V_{seuil}$ et $I_D \geq 0$

La loi des maille: $V_e = RI_D + V_D + E$

La diode étant passante VD $\geq$ Vseuil $\Rightarrow V_e \geq RI_D + V_{seuil} + E$ et $I_D \leq \dfrac{V_e - (E + V_{seuil})}{R}$

L'autre condition de conduction ID$\geq$0 $\Rightarrow V_e \geq E + V_{seuil}$

Donc sous la condition $V_e \geq E + V_{seuil}$ la diode est passante et le montage devient -voir figure

6- b) alors:

$$V_s = E + V_{seuil} + R_D.I_D$$

$$\text{Avec:} \quad I_D = \frac{V_e - (E + V_{seuil})}{R + R_D}$$

$$\text{Soit:} \quad V_s = \frac{R_D V_e}{R + R_D} + \frac{R(E + V_{seuil})}{R + R_D}$$

La tension $V_s$ est sinusoïdale atténuée relativement à $V_s$ plus une composante continue.
D'après l'étude précédente on peut distinguer les cas suivants:
- $E_M < E + V_{seuil}$ la diode est toujours bloquée; la tension $V_s = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 7 a).
- $E_M \geq E + V_{seuil}$ la tension $V_s = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 7 b).

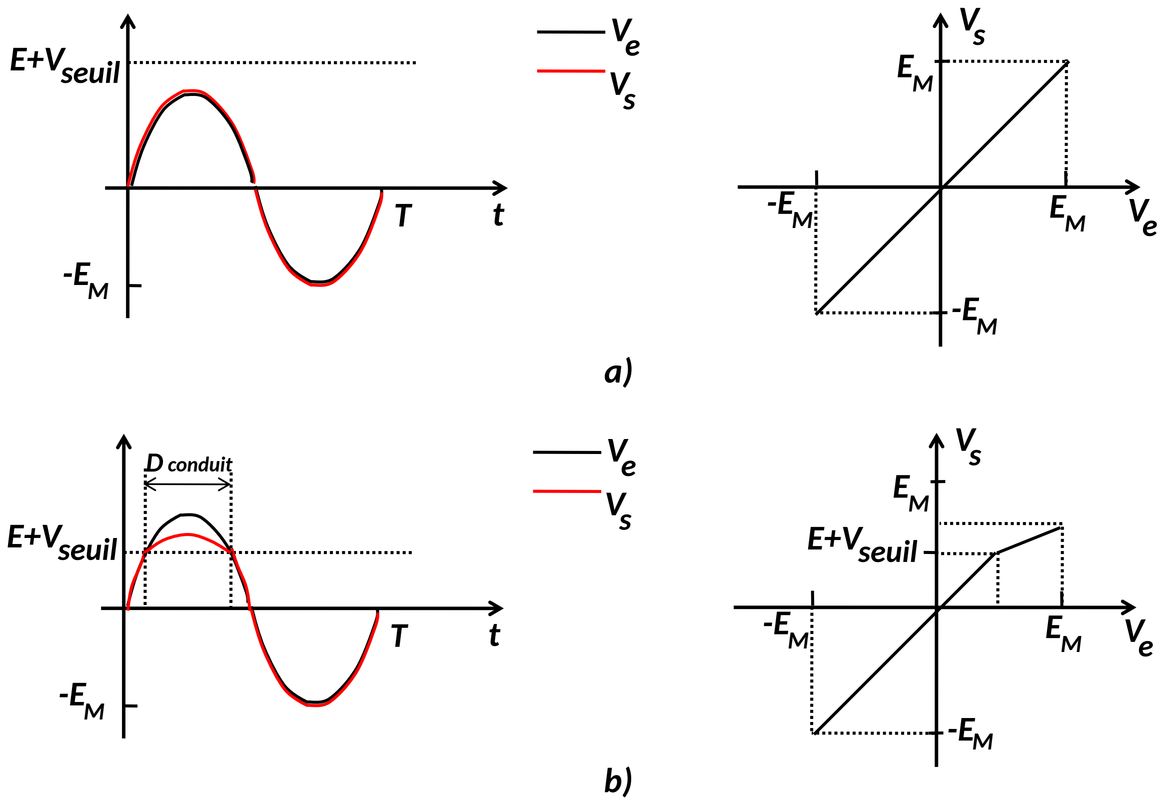


Figure 7: La tension de sortie et la caractéristique de transfert a) $E_M < E + V_{seuil}$ et b) $E_M \geq E + V_{seuil}$

**Excercice 4:**

La diode est insée dans le circuit de la figure 8 a)

1. Avant de trouver la droite de charge, on transforme le montage par son équivalent celui de la figure 8 b). Ce dernier est obtenu on cherchant le générateur de Thévenin vue par la diode.

$$R_{th} = R_1//R_2 = \frac{R_1.R_2}{R_1 + R_2} = 80\Omega$$

$$E_{th} = U_{AB} = \frac{E_1.R_2}{R + R_2} = 2.4\,V$$

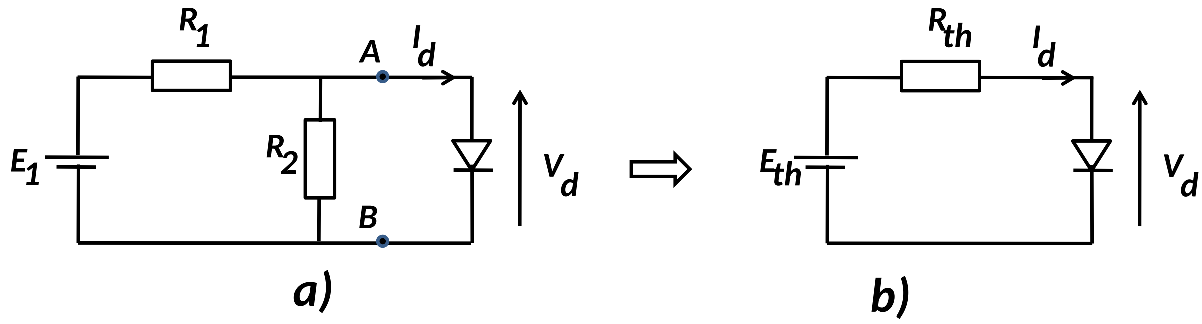


Figure 8: Le montage de Thévenin équivalent vue par la diode

La loi des mailles:

$$E_{th} = R_{th}.I_d + V_d \Rightarrow I_d = \frac{E_{th} - V_d}{R_{th}}$$
$$I_d = 0,03 - 0,0125.V_d$$

La droite de charge est de pente $-1/R_{th}$ passant par les points:

$$A = (I_d = \frac{E_{th}}{R_{th}},\ V_d = 0V) = (30mA,\ 0A)$$
$$B = (I_d = 0A,\ V_d = E_{th}) = (0A,\ 2.4V) \quad \text{se trouve à l'exterieur du graphe}$$

L'intersection de la droite de charge (D) et la caractéristique de la diode - voir figure 9- permet de trouver le point de fonctionnement $P\,(I_{d0} = 20\,mA,\ V_{d0} = 0,8V)$.
Il est possible de trouver le point de fonctionnement P par calcul car l'approximation d'ordre

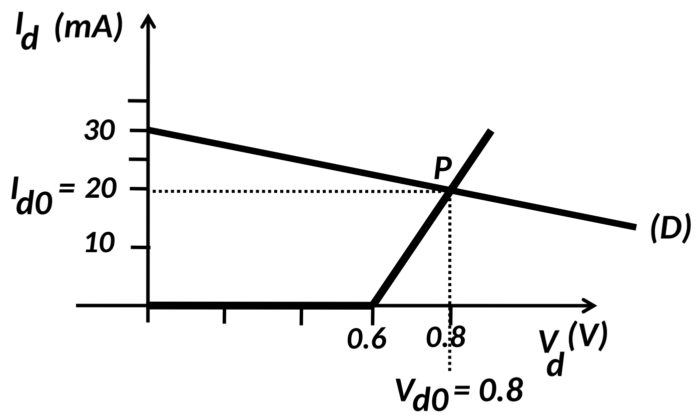


Figure 9: Détermination graphique du point de fonctionnement

trois permet d'écrire la caractéristique suivante:

$$I_d = a.V_d + b \quad a = \frac{\Delta I_d}{\Delta V_d} = 0,1\Omega^{-1} \quad b = -a.0,6 = -0,06$$

Soit $\qquad I_d(A) = 0,1.V_d(V) - 0,06$

$$\text{La caractéristique : } \begin{cases} 0 & \text{si } V_d < 0,6 \\ 0,1.V_d(V) - 0,06 & \text{sinon} \end{cases}$$

L'égalité entre l'équation de la caractéristique et celle de la droite de charge au point de fonctionnement permet:

$$0,03-0,0125.\mathrm{V_{d0}}=0,1.\mathrm{V_{d0}}-0,06 \Rightarrow \mathrm{V_{d0}}=\frac{0,03+0,06}{0,1+0,0125}=0,8\,\mathrm{V} \quad \text{et } \mathrm{I_{d0}}=20mA$$

Le régime dynamique est imposé par le générateur sinusoïdale $\mathrm{E_{1m}}\sin(2\pi ft)$. Pour obtenir l'équation de variation de la droite de charge il suffit de remplacer, dans l'expression de $\mathrm{E_{th}}$, $\mathrm{E_1}$ par $\mathrm{e_1}$:

$$\begin{aligned}
\mathrm{i_d} &= \frac{\mathrm{e_{th-v_d}}}{\mathrm{R_{th}}} \quad \text{avec } \mathrm{R_{th}}=\frac{\mathrm{R_1R_2}}{\mathrm{R_1+R_2}} \quad \text{et } \mathrm{e_{th}}=\frac{\mathrm{R_2.e_1}}{\mathrm{R_1+R_2}}\\
\mathrm{e_{th}} &= \frac{\mathrm{R_2.(E_1+E_{1m}}\sin(2\pi ft))}{\mathrm{R_1+R_2}}=2,4+0,4\sin(2\pi ft)\\
\mathrm{i_d} &= \frac{(2,4+0,4\sin(2\pi ft)-\mathrm{v_d})}{80}=(0,03+0,005\sin(100\pi t))-0,0125\mathrm{v_d}
\end{aligned}$$

On remarque que toutes les droites de charges se déplacent d'une manière parallèle, puisque elles possèdent la même pente (-0,0125) . Comme $-1 \leq \sin(100\pi t) \leq 1$ , on aura donc deux droites de charges limites $\mathrm{D_{min}}$ et $\mathrm{D_{max}}$:

$$\begin{cases} \text{Pour } \sin(100\pi t)=-1 & \mathrm{D_{min}}\ \mathrm{i_d}=\frac{2-\mathrm{v_d}}{80}=0,025-0,0125\mathrm{v_d}\\ \text{Pour } \sin(100\pi t)=1 & \mathrm{D_{max}}\ \mathrm{i_d}=\frac{2,8-\mathrm{v_d}}{80}=0,035-0,0125\mathrm{v_d}\end{cases}$$

L'équation de variation de la droite de charge est donnée par:

$$\mathrm{i_d}=\frac{(2,4+0,4\sin(2\pi ft)-\mathrm{v_d})}{80}=(0,03+0,005\sin(100\pi t))-0,0125\mathrm{v_d}$$

Si on s'intéresse au variation de $\mathrm{I_d}$ autour du point de repos -voir figure 10- :

$$\begin{aligned}
\mathrm{I_d} &= \mathrm{I_{d0}}+\mathrm{i_d}\\
\mathrm{I_d} &= 0,02+0,005\sin(100\pi t)
\end{aligned}$$

De même pour $\mathrm{V_d}$ autour du point de repos -voir figure 10- :

$$\begin{aligned}
\mathrm{V_d} &= \mathrm{V_{d0}}+\mathrm{v_d}\\
\mathrm{V_d} &= 0,8+0,05\sin(100\pi t)
\end{aligned}$$

2. Lors de la recherche de l'expression de la caractéristique de la diode on avait trouvé

$$\text{La caractéristique : }\begin{cases} 0 & \text{si } \mathrm{V_d}<0,6\\ 0,1.\mathrm{V_d}(V)-0,06 & \text{sinon}\end{cases}$$

Donc la diode est équivalente à celui de la figure 11: avec $\mathrm{V_{seuil}}=0.6V$ et $\mathrm{R_d}=\frac{1}{0,1}=10\Omega$. Par application du thórème de Thv́enin entre A et B -voir figure 12 on transforme le montage initial à celui b). Avec:

$$\begin{aligned}
\mathrm{R_{th}} &= \mathrm{R_5+R_4//R_3}\approx 100\,\Omega\\
\mathrm{e_{th}} &= \frac{\mathrm{R_4.V_e}}{\mathrm{R_4+R_5}}=13,64\,\sin(100\omega t)
\end{aligned}$$

On considère que la diode est passante (i.e $\mathrm{V_d} \geq \mathrm{V_{seuil}}$ -voir figure 11- ) le circuit devient équivalent à celui de la figure 13.

Calcul de $\mathrm{i_D}$:

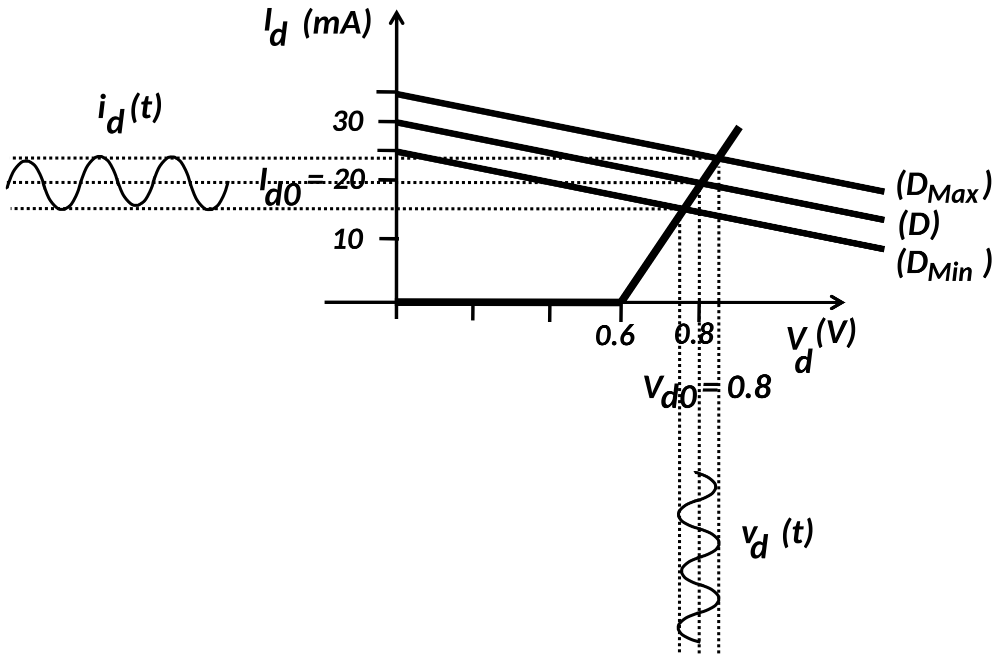


Figure 10: Variation de la droite de charge, $i_d$ et $v_d$

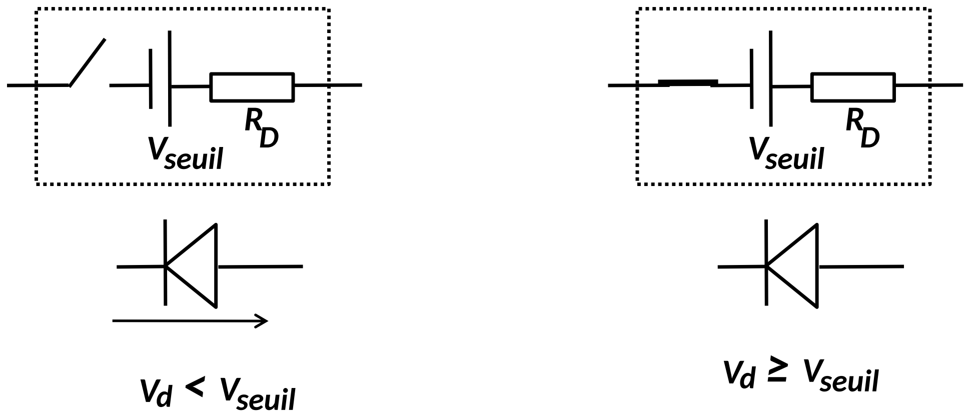


Figure 11: Schéma équivalent de la diode

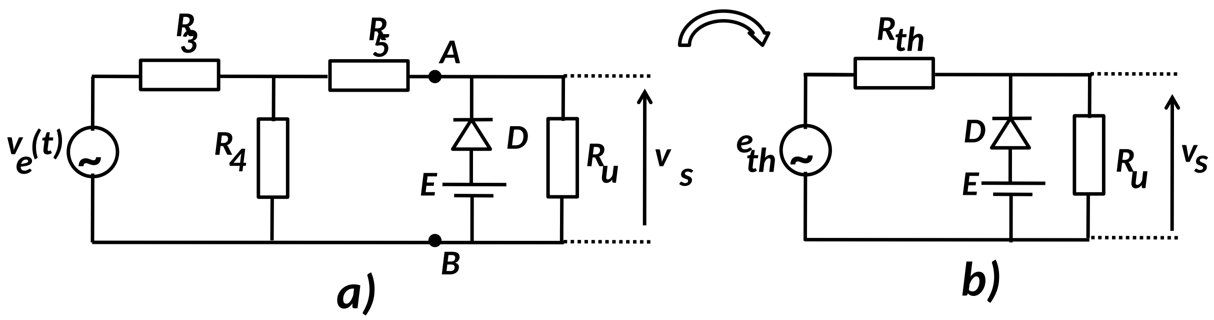


Figure 12: Le montage de Thv́enin alimentant la diode et $R_U$

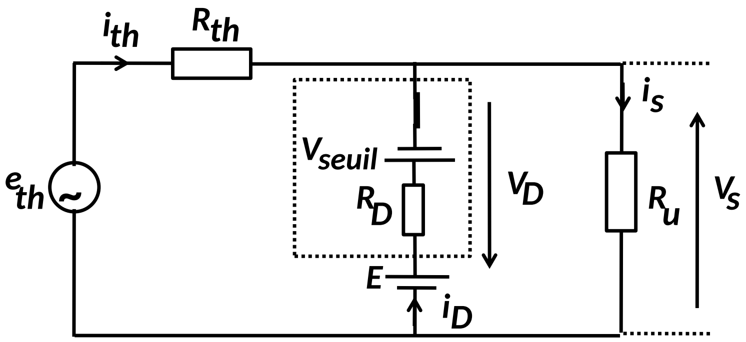


Figure 13: Le schéma équivalent lorsque la diode est passante

$$\text{on a:}\qquad \mathrm{V_S = (E - V_{seuil}) - R_D.i_D \Rightarrow i_D = \frac{(E - V_{seuil}) - V_S}{R_D}}$$

$$\text{Millman :}\quad \mathrm{V_S = \frac{\frac{e_{th}}{R_{th}} + \frac{(E-V_{seuil})}{R_D}}{\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_D} + \frac{1}{R_u}} \Rightarrow i_D = \frac{(E - V_{seuil}).\left(\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_u}\right) - \frac{e_{th}}{R_{th}}}{1 + R_D.\left(\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_u}\right)}}$$

$$\mathrm{i_D = \frac{(E - V_{seuil}).\left(\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_u}\right) - \frac{V_e.R_4}{R_{th}.(R_3+R_4)}}{1 + R_D.\left(\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_u}\right)}}$$

Calcul de $\mathrm{V_D}$:

$$\mathrm{V_D = R_D i_D + V_{seuil}}$$

$$\mathrm{V_D = R_D \frac{(E - V_{seuil}).\left(\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_u}\right) - \frac{V_e.R_4}{R_{th}.(R_3+R_4)}}{1 + R_D.\left(\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_u}\right)} + V_{seuil}}$$

$\mathrm{i_D} = 0$ si la diode est bloquante c'est-à-dire:

$$\mathrm{V_D < V_{seuil} \Rightarrow V_D - V_{seuil} = R_D.i_D < 0}$$

$$\text{Soit:}\quad \mathrm{(E - V_{seuil}).\left(\frac{1}{R_{th}} + \frac{1}{R_u}\right) - \frac{V_e.R_4}{R_{th}.(R_3 + R_4)} < 0}$$

$$\text{en fin:}\quad \mathrm{V_e > (E - V_{seuil}).\left(1 + \frac{R_{th}}{R_u}\right).\left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)}$$

La diode étant bloquée ($\mathrm{i_D} = 0$), le circuit de la figure 13 se réduit à une seul maille : générateur de Thévenin en série avec $\mathrm{R_u}$. Donc:

$$\text{Diviseur de tension:}\mathrm{V_S = \frac{R_u}{R_u + R_{th}} e_{th} = \frac{R_u}{R_u + R_{th}}.\frac{R_4}{R_3 + R_4}.V_e = 0,045V_e}$$

**Excercice 5:**

La diode Zener sert principalement à stabiliser la tension, après redressement et filtrage. Elle assure cette fonction en polarisation inverse -voir figure 14 a)-.

1. Avant de calculer $\mathrm{R_1}$, il faut connaitre l'état de la diode Zener pour $\mathrm{V_e} = 40\,V$.
   La diode Zener en polarisation inverse peut prendre deux états:
   - Polarisation inverse bloquante (I.B) -①: $\mathrm{v_z > -V_Z} = -45\,V$
   - Polarisation inverse conductrice (I.C) -②: $\mathrm{v_z \leq -V_Z} = -45\,V$

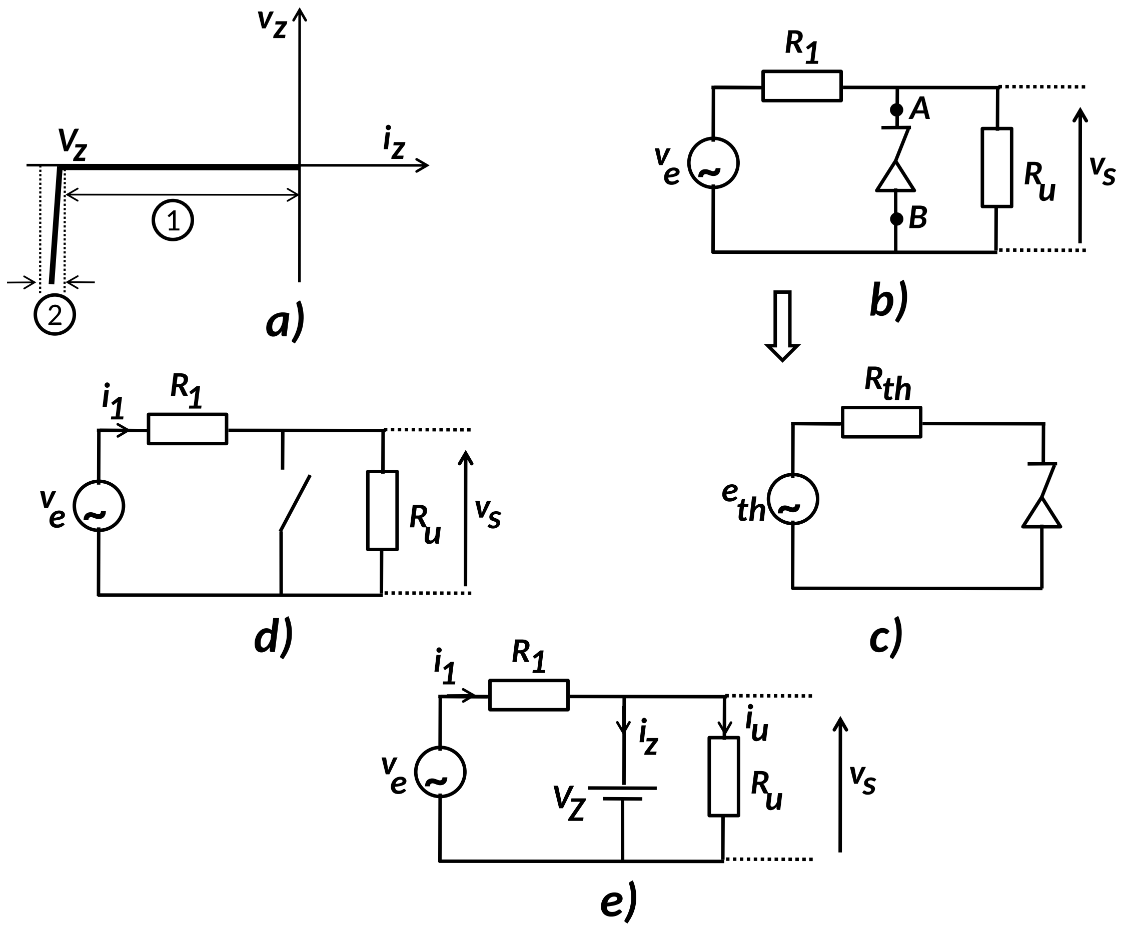


Figure 14: Figures de l'exercice 5

Pour connaitre l'état prise par la diode Zener pour $V_e = 40\,V$, il faut chercher le générateur de Thévenin vue par la diode voir figure 14 b) et c)-:

$$R_{Th} = R_1//R_u = \frac{R_1.R_u}{R_1+R_u}$$
$$e_{Th} = U_{AB} = \frac{R_u.V_e}{R_u+R_1}$$

La tension au borne de la diode Zener:

$$v_z = e_{Th} - R_{Th}.i_z$$
$$\text{La diode est en état (I.B) si: } v_z > -V_Z \quad \text{or } i_z = 0$$
$$\text{Donc} \quad v_z = e_{Th} - R_{Th} > -V_Z$$
$$\text{Soit} \quad V_e > -V_Z.\left(1+\frac{R_1}{R_u}\right)$$
$$V_e > -45.\left(1+\frac{R_1}{R_u}\right)$$

Pour $V_e = 40\,V$, quelque soit la valeur de $R_1$ et $R_u$, la diode sera dans l'état (I.B)①. Alors le circuit devient équivalent à celui de la figure 14 d). Donc:

$$i_1 = \frac{V_e}{R_1+R_u} \Rightarrow R_1 = \frac{V_e}{i_1} - R_u = 200\,\Omega$$

2. D'après l'étude précédente le seuil de régulation est lorsque:

$$\mathrm{V_e} = -\mathrm{V_Z}.\left(1+\frac{\mathrm{R_1}}{\mathrm{R_u}}\right) = -50V$$

3. Pour $-50V \leq \mathrm{V_e} \leq -40V$ la diode est état (I.B) -1 et :

$$\mathrm{V_S} = \frac{\mathrm{R_u}}{\mathrm{R_u}+\mathrm{R_1}}.\mathrm{V_e} = 0,9\mathrm{V_e}$$

   La diode prend l'état (I.C) -2 $\Rightarrow -60V \leq \mathrm{v_z} < -45V \Rightarrow -60\left(1+\frac{\mathrm{R_1}}{\mathrm{R_u}}\right) \leq \mathrm{v_e} < -45\left(1+\frac{\mathrm{R_1}}{\mathrm{R_u}}\right)V$.
   Donc pour $-66,6V \leq \mathrm{V_e} < -50V$ la tension $\mathrm{V_S}$ est régulée - Voir figure 14 e):

$$\mathrm{V_S} = \mathrm{V_Z} = 45V$$

4. L'intensité du courant dans la diode $\mathrm{i_z}$ est:

$$\mathrm{i_z} = \mathrm{i_1} - \mathrm{i_u} = \frac{\mathrm{V_e}-\mathrm{V_S}}{\mathrm{R_1}} - \frac{\mathrm{V_S}}{\mathrm{R_u}} = \frac{\mathrm{V_e}}{\mathrm{R_1}} - \mathrm{V_Z}.\left(\frac{1}{\mathrm{R_1}}+\frac{1}{\mathrm{R_u}}\right)$$

$$\mathrm{i_z} = 0,05A$$