



CORRECTION TD N°3 : Les Diodes à semi-conducteur

Eléments Électronique-AP2

2016-2017

Exercice 1:

À partir de la loi d'action de masse ($n_i^2 = np$):

$$n=p=n_i = (N_C N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) \quad (1)$$

Avec:

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

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

$$\text{La masse de } 5.10^{12} \text{ de Sb} = \frac{5.10^{12}}{N_A} \cdot \text{Masse atomique}$$

$$\text{Soit} = 2,3322 \cdot 10^{-10} \text{ g}$$

$$\text{Le volume de Sb rechercher} = \text{masse de } 5.10^{12} \text{ de Sb} / \text{masse volumique de Sb} (\text{g.cm}^{-3})$$

$$\text{Soit} \approx 1,001 \cdot 10^{-10} \text{ cm}^3$$

$$\text{la concentration du dopant est } N_D = \frac{1}{1.10^{-10}} = 1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

L'antimoine (Sb) appartient à la 5^{ème} 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:

$$n.p = n_i^2 \quad (2)$$

Outre la neutralité électrique du cristal conduit à la relation:

$$q(p + N_D) = q(n + N_A) \quad (3)$$

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

$$n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2 = 0 \quad (4)$$

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

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

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

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

4. Il faut chercher T tel-que:

$$\begin{aligned} n_i > 10 N_D &\Rightarrow n_i^2 > 100 N_D^2 \\ (N_C N_V) \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right) &> 100 N_D^2 \\ \text{soit } 3(10^{19})^2 \left(\frac{T}{300}\right)^3 \exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right) &> 100 N_D^2 \\ T \exp\left(-\frac{E_G}{3kT}\right) &> 9,65 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

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

Exercice 2:

Étude de la conductivité d'un semi-conducteur extrinsèque

1. L'Arsenic (As) appartient la 5^{ème} colonne de tableau périodique; 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:

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

2. La conductivité du cristal avec dopage est de:

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

La conductivité du cristal sans dopage est de:

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

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

3. Le courant I est donné par:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{VS}{\rho l} = \frac{0,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-2}}{0,0363 \cdot 1,3} = 0,1271 \text{ A}$$

Quant à la densité du courant:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{0,1271}{1,2 \cdot 10^{-2}} = 9,5 \text{ Acm}^{-2}$$

Exercice 3:

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

1. Recherche de condition de blocage de la diode:

la diode bloquée $\Rightarrow V_D < 0$ et $I_D = 0$

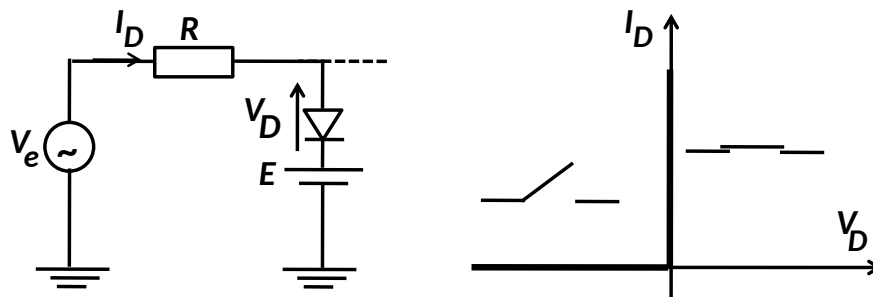


Figure 1: Tension et courant de la diode supposée idéale

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

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

L'autre condition de blocage $VD<0 \Rightarrow V_e < E$

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

$$V_s = V_e$$

Recherche de condition de conduction de la diode:

La diode est passante $\Rightarrow V_D = 0$ et $I_D \geq 0$

Toujours la loi des mailles: $V_e = RI_D + V_D + E$

La diode étant passante $VD=0 \Rightarrow V_e = RI_D + E$ et $I_D = \frac{V_e - E}{R}$

L'autre condition de conduction $ID \geq 0 \Rightarrow V_e \geq E$

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

$$V_s = E$$

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

- $E_M < E$ la diode est toujours bloquée; la tension $V_s = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 3 a).
- $E_M \geq E$ la tension $V_s = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 3 b).

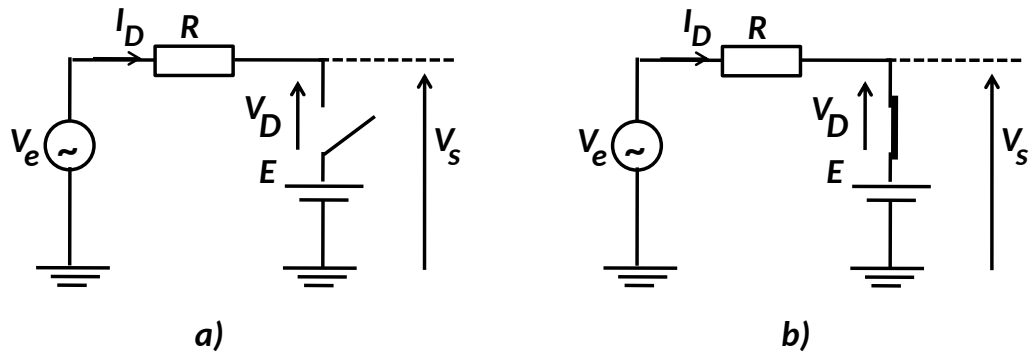


Figure 2: Montage équivalent pour la diode bloquée a) et la diode passante b)

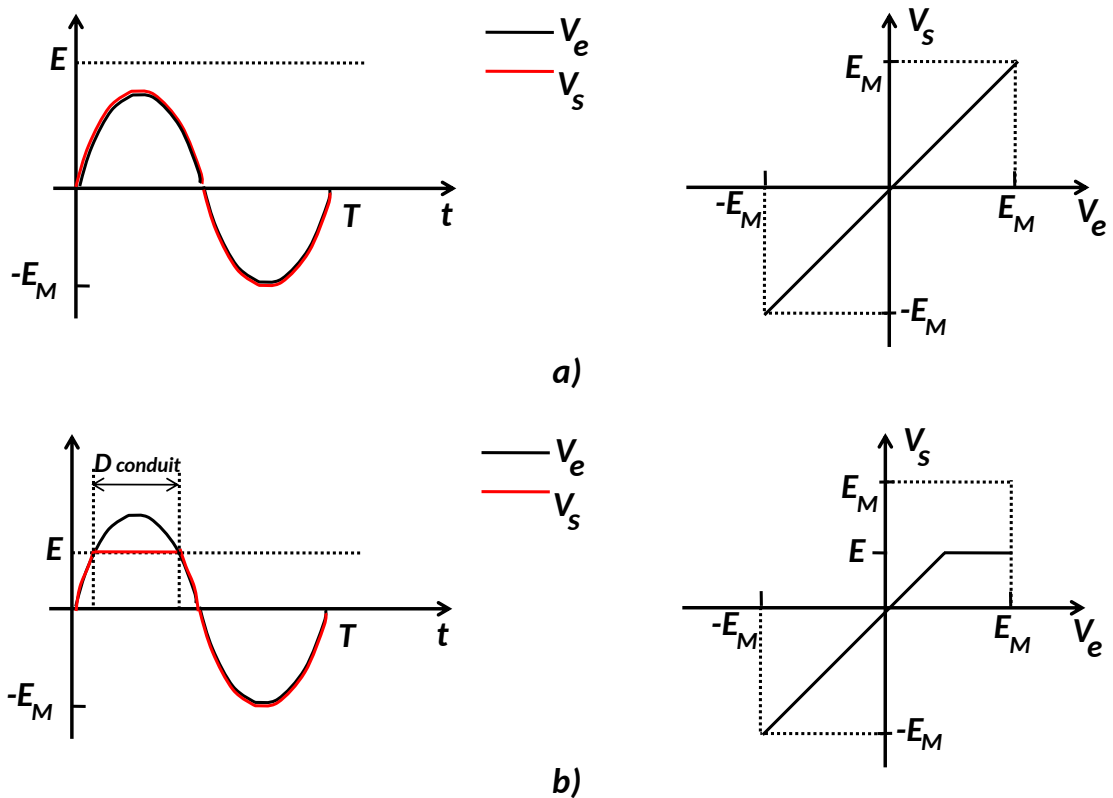


Figure 3: La tension de sortie et la caractéristique de transfert a) $E_M < E$ et b) $E_M \geq E$

2. Étude sous l'hypothèse de diode (2^{ème} approximation):

Recherche de condition de blocage de la diode:

la diode bloquée $\Rightarrow V_D < V_{\text{seuil}}$ et $I_D = 0$

$$\text{La loi des maille: } V_e = RI_D + V_D + E$$

$$\text{La diode étant bloquée } I_D = 0 \Rightarrow V_e = V_D + E \quad \text{et} \quad V_D = V_e - E$$

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

Donc sous la condition $V_e < E + V_{\text{seuil}}$ la diode est bloquée et elle est équivalent à un inter-

rupteur ouvert en série avec le générateur de tension V_{seuil} -voir figure 4 a)-alors:

$$V_s = V_e$$

Recherche de condition de conduction de la diode:

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

$$\text{La loi des maille: } V_e = RI_D + V_D + E$$

$$\text{La diode étant passante } V_D = V_{seuil} \Rightarrow V_e = RI_D + V_{seuil} + E \quad \text{et } I_D = \frac{V_e - (E + V_{seuil})}{R}$$

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

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:

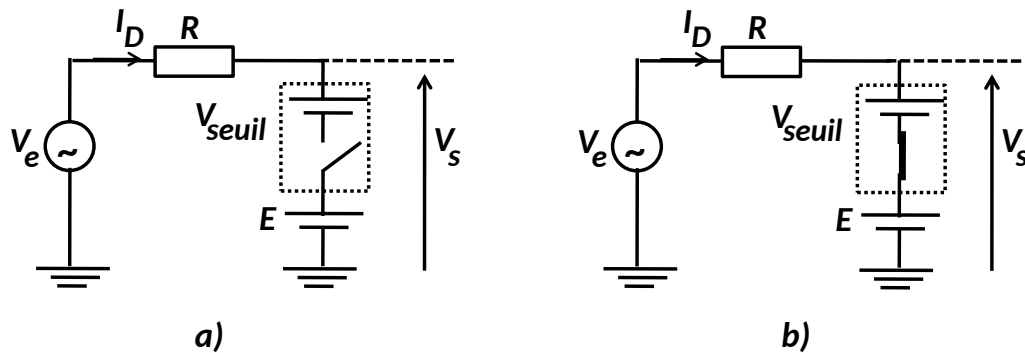


Figure 4: Montage équivalent (2^{ème} approximation) D bloquée a) et D passante b)

- $E_M < E + V_{seuil}$ 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 (3^{ème} approximation):

Recherche de condition de blocage de la diode:

la diode bloquée $\Rightarrow V_D < V_{seuil}$ et $I_D = 0$

$$\text{La loi des maille: } V_e = RI_D + V_D + E$$

$$\text{La diode étant bloquée } I_D = 0 \Rightarrow V_e = V_D + E \quad \text{et } V_D = V_e - E$$

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

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

$$V_s = V_e$$

Recherche de condition de conduction de la diode:

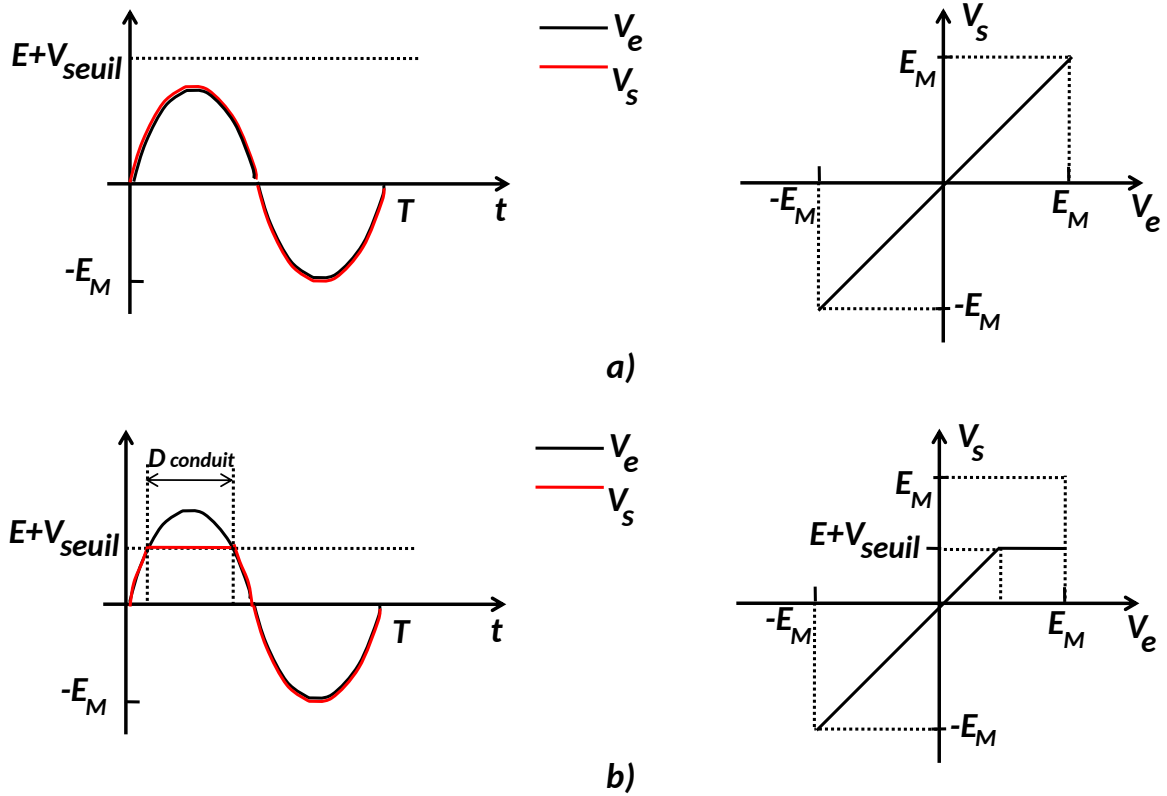


Figure 5: La tension de sortie et la caractéristique de transfert a) $E_M < E + V_{seuil}$ et b) $E_M \geq E + V_{seuil}$

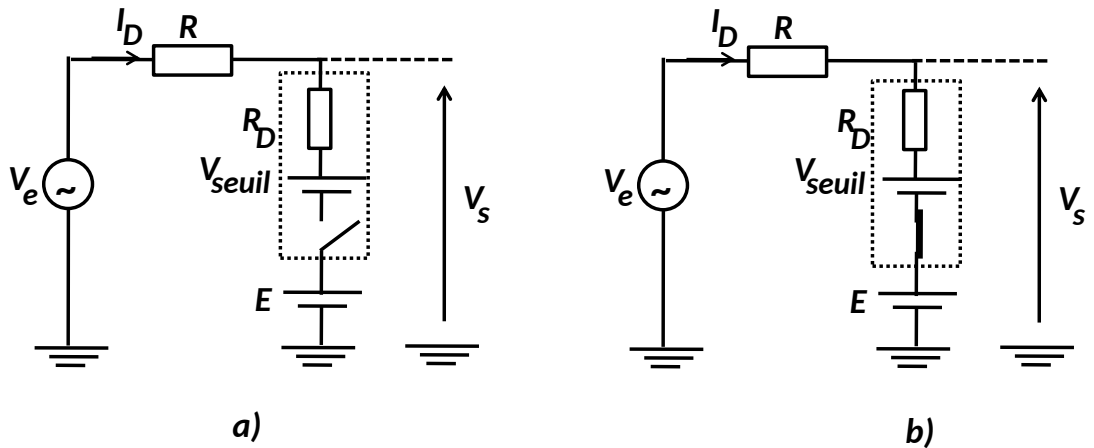


Figure 6: Montage équivalent (3^{ième} approximation) D bloquée a) et D passante b)

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 $V_D \geq V_{seuil} \Rightarrow V_e \geq RI_D + V_{seuil} + E$ et $I_D \leq \frac{V_e - (E + V_{seuil})}{R}$

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

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

6- b) alors:

$$V_s = E + V_{\text{seuil}} + R_D \cdot I_D$$

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

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

La tension V_s est sinusoïdale atténuée relativement à V_e plus une composante continue.

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

- $E_M < E + V_{\text{seuil}}$ la diode est toujours bloquée; la tension $V_s = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 7 a).
- $E_M \geq E + V_{\text{seuil}}$ la tension $V_s = f(t)$ et la caractéristique de transfert sont présentées sur la figure 7 b).

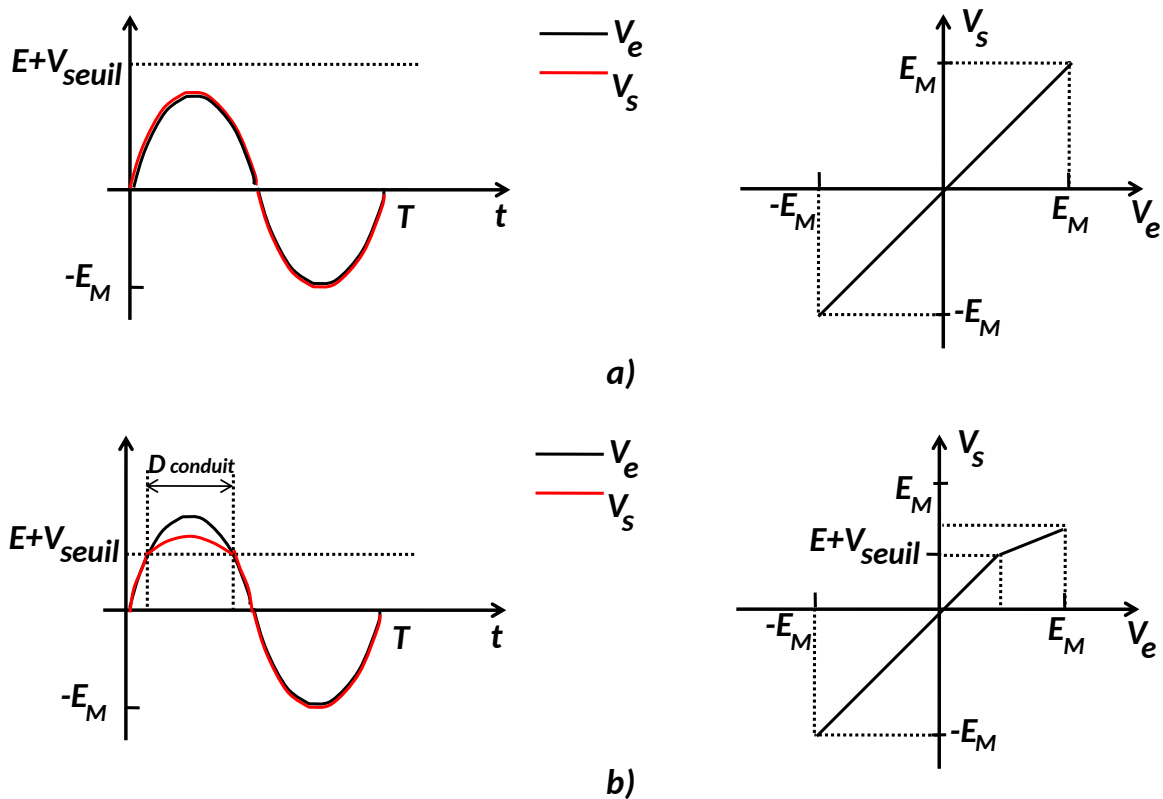


Figure 7: La tension de sortie et la caractéristique de transfert a) $E_M < E + V_{\text{seuil}}$ et b) $E_M \geq E + V_{\text{seuil}}$

Exercice 4:

La diode est insérée 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.

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

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

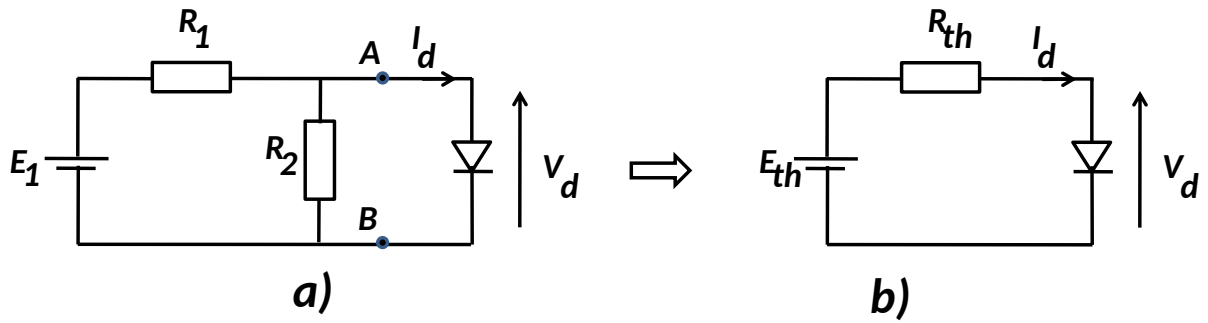


Figure 8: Le montage de Thévenin équivalent vue par la diode

La loi des mailles:

$$E_{th} = R_{th} \cdot I_d + V_d \Rightarrow I_d = \frac{E_{th} - V_d}{R_{th}}$$

$$I_d = 0,03 - 0,0125 \cdot V_d$$

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

$$A = (I_d = \frac{E_{th}}{R_{th}}, V_d = 0V) = (30mA, 0A)$$

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

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 ($I_{d0} = 20mA$, $V_{d0} = 0,8V$).

Il est possible de trouver le point de fonctionnement P par calcul car l'approximation d'ordre

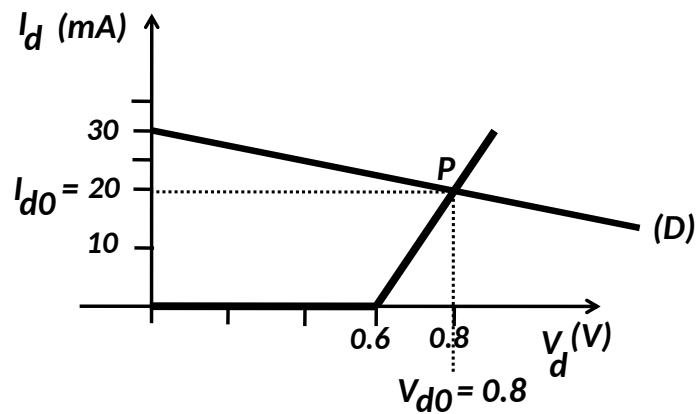


Figure 9: Détermination graphique du point de fonctionnement

trois permet d'écrire la caractéristique suivante:

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

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

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

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

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

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

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

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 D_{min} et D_{max} :

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

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

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

Si on s'intéresse à la variation de I_d autour du point de repos -voir figure 10- :

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

De même pour V_d autour du point de repos -voir figure 10- :

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

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

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

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

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

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

Calcul de i_D :

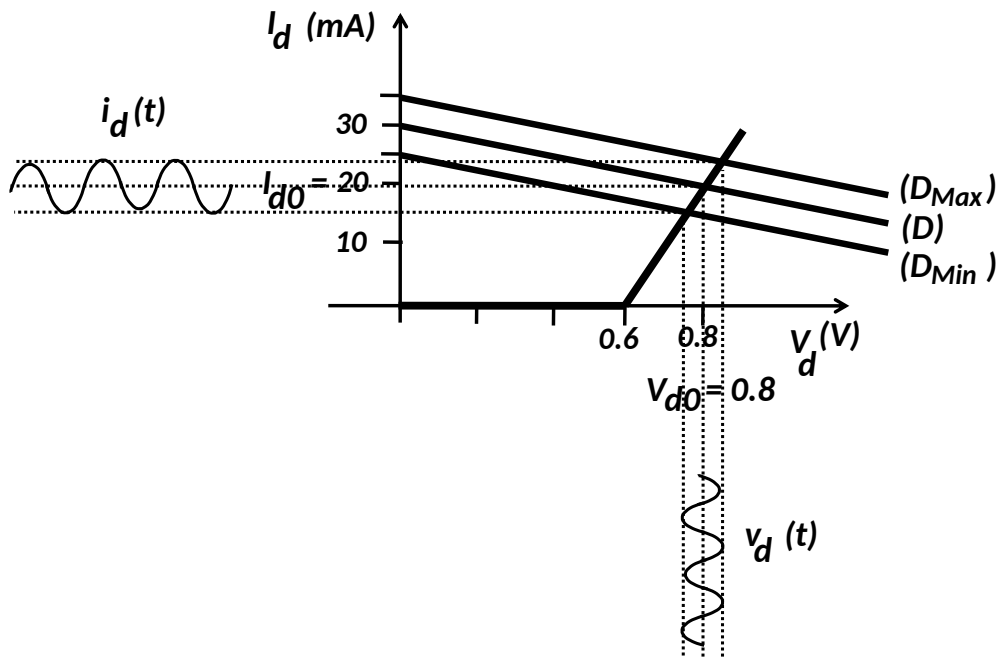


Figure 10: Variation de la droite de charge, i_d et v_d

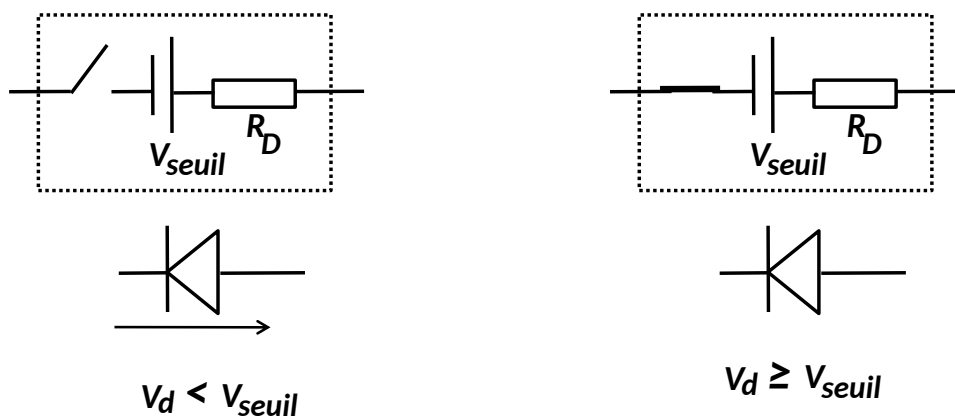


Figure 11: Schéma équivalent de la diode

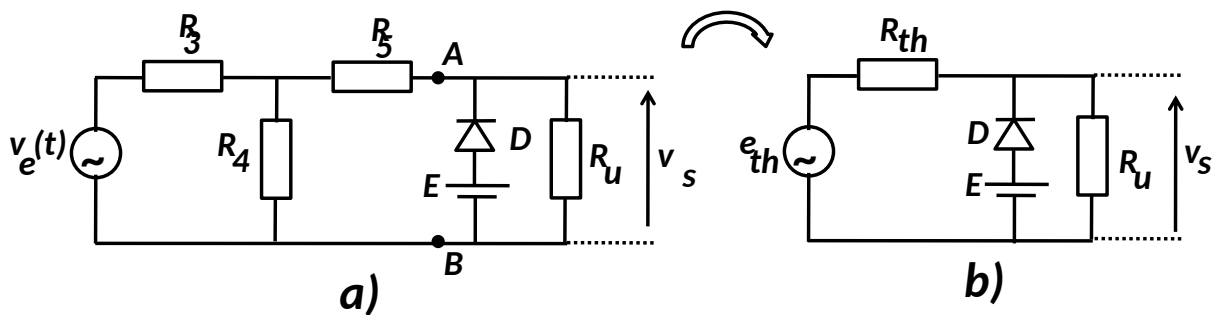


Figure 12: Le montage de Thévenin alimentant la diode et R_U

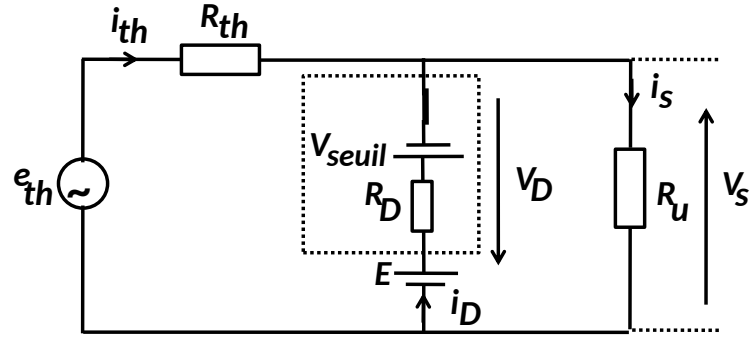


Figure 13: Le schéma équivalent lorsque la diode est passante

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

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

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

Calcul de V_D :

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

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

$i_D = 0$ si la diode est bloquante c'est-à-dire:

$$V_D < V_{\text{seuil}} \Rightarrow V_D - V_{\text{seuil}} = R_D \cdot i_D < 0$$

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

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

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

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

Exercice 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 R_1 , il faut connaître l'état de la diode Zener pour $V_e = 40 \text{ V}$.

La diode Zener en polarisation inverse peut prendre deux états:

- Polarisation inverse bloquante (I.B) -①: $v_z > -V_Z = -45 \text{ V}$
- Polarisation inverse conductrice (I.C) -②: $v_z \leq -V_Z = -45 \text{ V}$

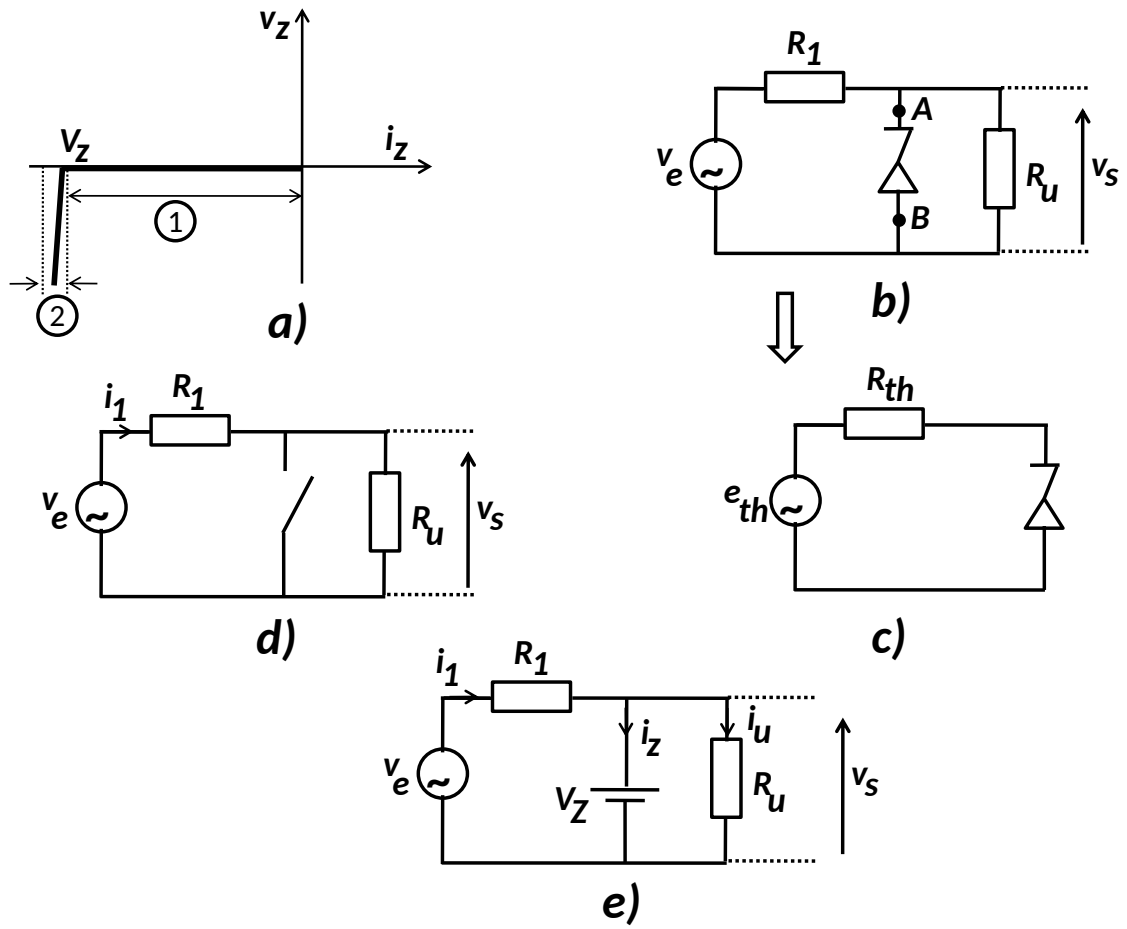


Figure 14: Figures de l'exercice 5

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

$$R_{Th} = R_1 // R_u = \frac{R_1 \cdot R_u}{R_1 + R_u}$$

$$e_{Th} = U_{AB} = \frac{R_u \cdot V_e}{R_u + R_1}$$

La tension au borne de la diode Zener:

$$v_Z = e_{Th} - R_{Th} \cdot i_Z$$

La diode est en état (I.B) si: $v_Z > -V_Z$ or $i_Z = 0$

$$\text{Donc } v_Z = e_{Th} - R_{Th} > -V_Z$$

$$\text{Soit } V_e > -V_Z \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_u}\right)$$

$$V_e > -45 \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_u}\right)$$

Pour $V_e = 40\text{ V}$, 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:

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

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

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

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

$$V_S = V_Z = 45V$$

4. L'intensité du courant dans la diode i_z est:

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

$$i_z = 0,05A$$