

CIRCUITS ÉLECTRONIQUES

ELE2302

Chap. 2 : Diodes – Applications

Abdelhakim Khouas

Tél. : 340-4711 poste 5116

Local : M-5416

Courriel : akhouas@polymtl.ca

Objectifs

Appliquer les notions théoriques vues la semaine dernière

Apprendre à analyser des circuits conçus avec des diodes

Se familiariser avec certaines applications importantes en électronique

- ◆ Régulateur de tension
- ◆ Convertisseur AC-DC

Plan

Régulateur de tension avec la diode Zener

Convertisseur AC-DC

Redresseurs

- ♦ Redresseur simple alternance
- ♦ Redresseur double alternance
- ♦ Redresseur en pont
- ♦ Redresseur avec filtre

Autres applications

Autres types de diode

Régulateur de tension

C'est quoi ?

- ♦ C'est un circuit qui permet de fournir une tension constante

Pourquoi ?

- ♦ Pour garder la tension la plus constante possible, lorsqu'on a :
 - ❖ Changement dans le courant de charge (résistance de charge)
 - ❖ Variations dans la tension d'alimentation

Comment ?

- ♦ Utilisation de la diode en polarisation directe
 - ❖ Voir modèle chute de tension de la diode
- ♦ Utilisation de la diode en polarisation inverse (diode Zener) « Shunt regulator »

Diode Zener (rappel)

C'est quoi une diode Zener ?

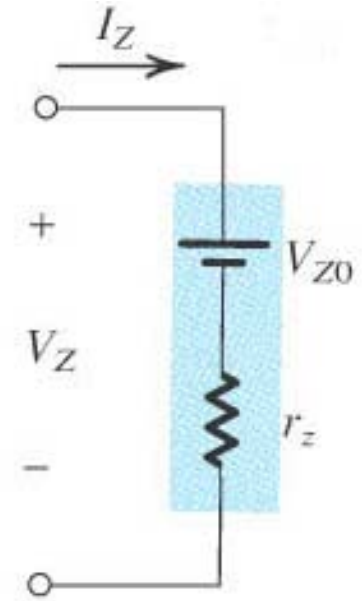
- ♦ Diode qui a été modifiée pour qu'elle fonctionne en région de Cassure

Équation de la diode Zener (caractéristique $i-v$)

- ♦ Pour un courant $I_Z > I_{ZK}$, on a :

$$V_Z = V_{Z0} + r_Z I_Z$$

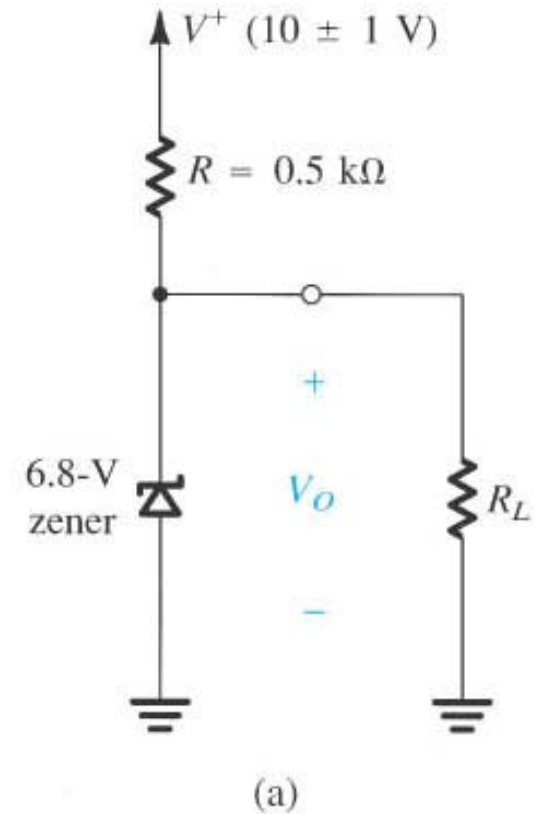
- ♦ I_{ZK} : Courant de Knee Zener
- ♦ r_Z : résistance incrémentale au point d'opération
- ♦ V_{Z0} : Tension correspondant à l'intersection de la droite avec l'axe $I_Z=0$ ($V_{Z0}=V_{ZK}$)



Régulateur de tension (diode Zener)

Exemple d'un régulateur de tension

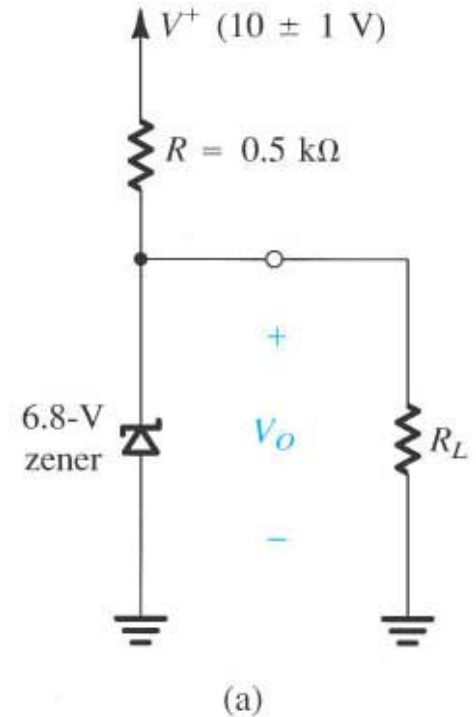
On dispose d'un bloc d'alimentation fournissant une tension V^+ de $10V$ avec des variations de $\pm 1V$. On désire régulariser la sortie à $6,8V$ en utilisant le circuit exemple « shunt regulator » ci-contre. La diode Zener utilisée est une $6.8V-5mA$ diode avec $I_{ZK}=0.2mA$ et $r_Z=20\Omega$. La résistance $R=0.5k\Omega$.



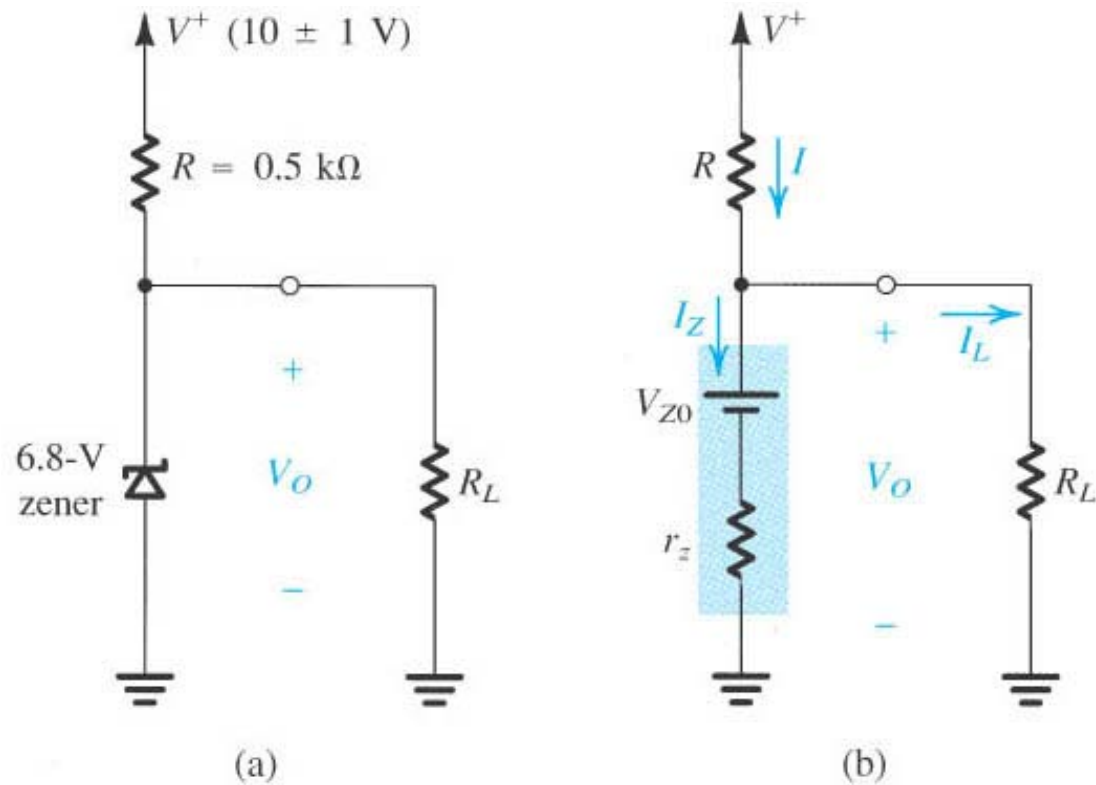
Régulateur de tension (diode Zener)

Exemple d'un régulateur de tension

- a) Calculez V_o sans la charge et lorsque $V^+ = 10V$.
- b) Calculez ΔV_o produit par un changement de $\pm 1V$ sur V^+ « line regulation »
- c) Calculez ΔV_o produit en branchant une résistance de charge $R_L = 2k\Omega$ « load regulation »
- d) Calculez V_o produit en branchant une résistance de charge $R_L = 0,5k\Omega$
- e) Quelle est la plus petite valeur de R_L qui permet de faire fonctionner la diode Zener dans la région de cassure ?



Régulateur de tension (diode Zener)



Exemple d'un circuit régulateur de tension utilisant la diode Zener « shunt regulator », (a) circuit et (b) circuit équivalent

Régulateur de tension (diode Zener)

Exemple d'un régulateur de tension

Caractéristiques de la diode : $6.8V-5mA$ avec $I_{ZK}=0.2 mA$ et $r_Z=20 \Omega$.

a) Calcul de V_o sans la charge

1- Calcul de V_{Z0} , on a : $6.8 = V_{Z0} + 20 \times 0.005$

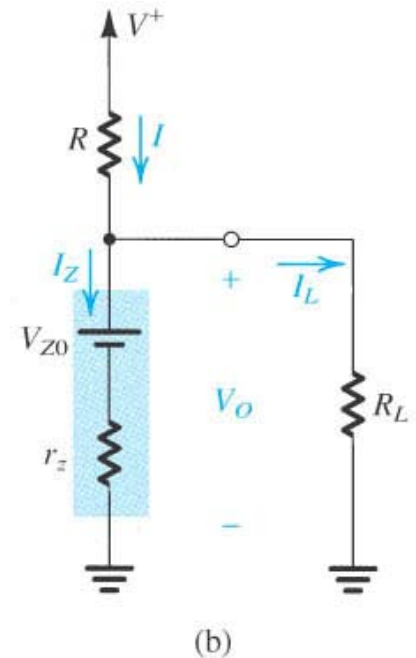
$$\Rightarrow V_{Z0} = 6.8 - 0.1 = 6.7V$$

2- Calcul de V_o sans charge : $V_o = V_{Z0} + r_Z I_Z$

$$I_Z = \frac{V^+ - V_{Z0}}{R + r_Z} = \frac{10 - 6.7}{500 + 20} = 6.35mA$$

$$\text{On a : } V_o = V_{Z0} + r_Z I_Z$$

$$\Rightarrow V_o = 6.7 + 20 \times 6.35 = 6.83V$$



Régulateur de tension (diode Zener)

Exemple d'un régulateur de tension

Caractéristiques de la diode : $6.8V-5mA$ avec $I_{ZK}=0.2 mA$ et $r_Z=20 \Omega$.

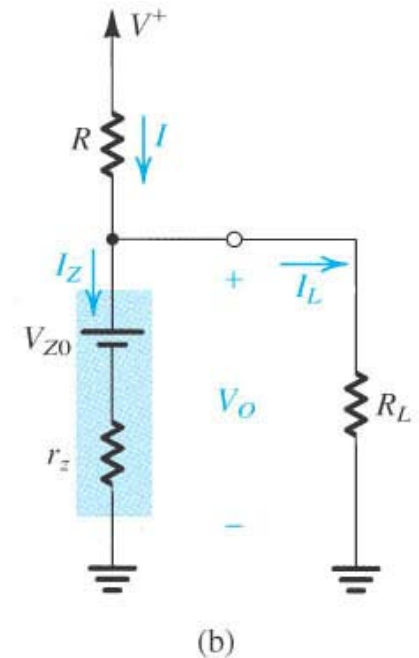
b) Calcul de ΔV_o pour $\Delta V^+=\pm 1V$

$$\text{On a : } V_o = V_{Z0} + r_Z I_Z$$

$$\Rightarrow \Delta V_o = r_Z \Delta I_Z$$

$$\text{On a : } I_Z = \frac{V^+ - V_{Z0}}{R + r_Z} \Rightarrow \Delta I_Z = \frac{\Delta V^+}{R + r_Z}$$

$$\Rightarrow \Delta V_o = r_Z \frac{\Delta V^+}{R + r_Z} = \pm \frac{20}{520} = \pm 38.5 mV$$



Régulateur de tension (diode Zener)

Exemple d'un régulateur de tension

Caractéristiques de la diode : $6.8V-5mA$ avec $I_{ZK}=0.2 mA$ et $r_Z=20 \Omega$.

c) Calcul de ΔV_o pour $R_L=2k\Omega$

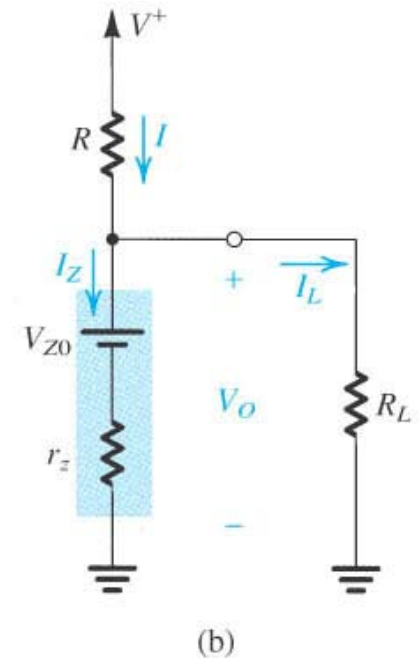
Le courant dans la charge est :

$$I_L \approx \frac{6.8}{2} = 3.4mA$$

$$\text{Donc } \Delta I_Z = -I_L = -3.4mA$$

$$\text{On a : } \Delta V_o = r_Z \Delta I_Z$$

$$\Rightarrow \Delta V_o = 20 \times (-3.4) = 68mV$$



Régulateur de tension (diode Zener)

Exemple d'un régulateur de tension

Caractéristiques de la diode : $6.8V-5mA$ avec $I_{ZK}=0.2 mA$ et $r_Z=20 \Omega$.

d) Calcul de V_o pour $R_L=0.5k\Omega$

Si on considère que $V_o \approx 6.8V$ alors :

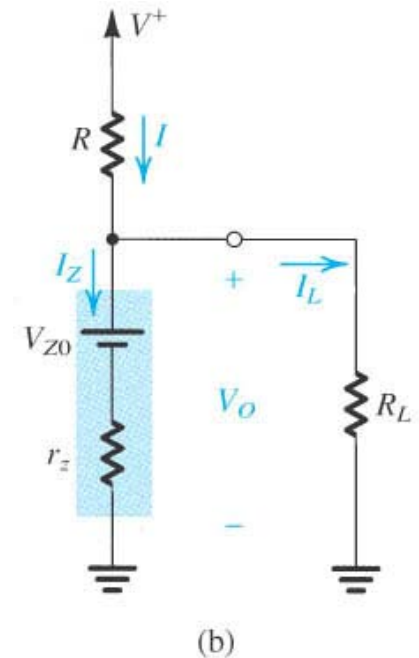
le courant dans la charge est :

$$I_L \approx \frac{6.8}{0.5} = 13.6mA \text{ (ce qui est impossible)}$$

Donc la diode est bloquante

$$\Rightarrow V_o=0 \text{ et } I_L = V^+ \frac{R_L}{R + R_L}$$

$$\Rightarrow V_o = 10 \frac{0.5}{1} = 5V$$



Régulateur de tension (diode Zener)

Exemple d'un régulateur de tension

Caractéristiques de la diode : $6.8V-5mA$ avec $I_{ZK}=0.2 mA$ et $r_Z=20 \Omega$.

e) Calcul de la plus petite valeur de R_L qui permet de faire fonctionner la diode Zener dans la région de cassure

Le courant min est : $I_{Z\min} = 0.2mA$

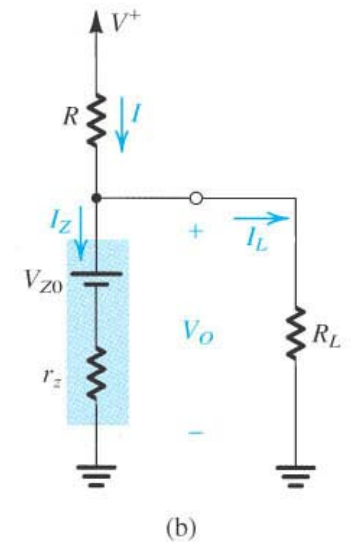
$$\Rightarrow V_0 = 6.7 + 20 \times 0.2 \times 10^{-4} \approx 6.7V$$

Le courant fourni à travers R est :

$$I = \frac{V^+ - V_0}{R} = \frac{10 - 6.7}{500} = 6.6mA$$

Le courant à travers R_L est : $I_L = 6.6 - 0.2 = 6.4mA$

$$\Rightarrow R_{L\min} = \frac{V_0}{I_L} = \frac{6.7}{6.4} \approx 1.05k\Omega$$



Redresseur

C'est quoi ?

- ♦ C'est un circuit qui permet de transformer une source de tension alternative, dont la valeur moyenne est nulle, en une tension dont la valeur moyenne est plus grande que zéro
 - ❖ Le redresseur est l'application des diodes la plus importante

Pourquoi ?

- ♦ Le redresseur est utilisé dans les blocs d'alimentation DC

Types de redresseur :

- ♦ Redresseur simple alternance
- ♦ Redresseur pleine onde avec prise médiane
- ♦ Redresseur pleine onde en pont

Redresseur

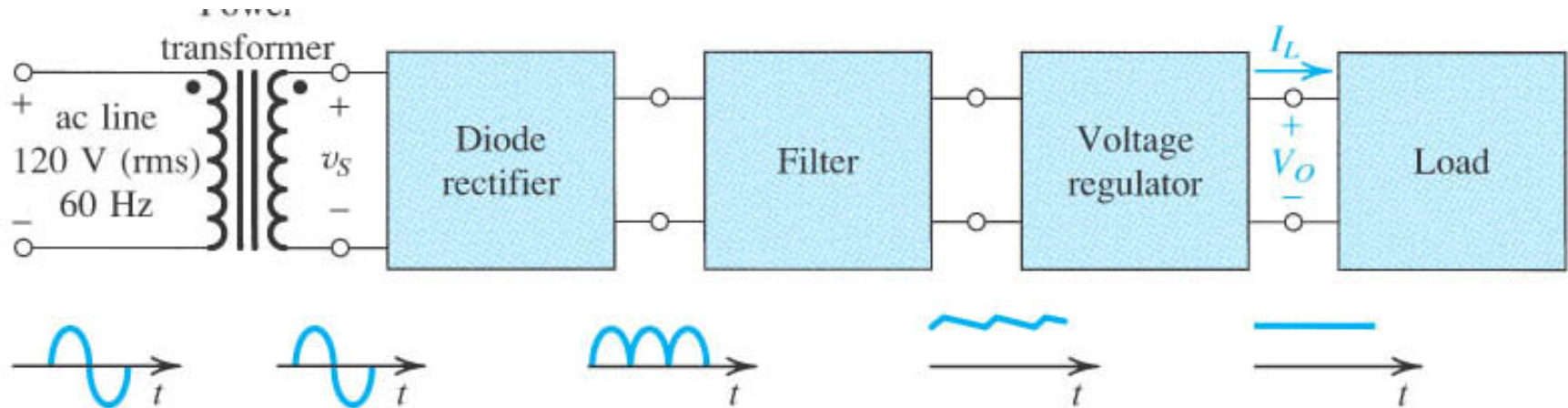
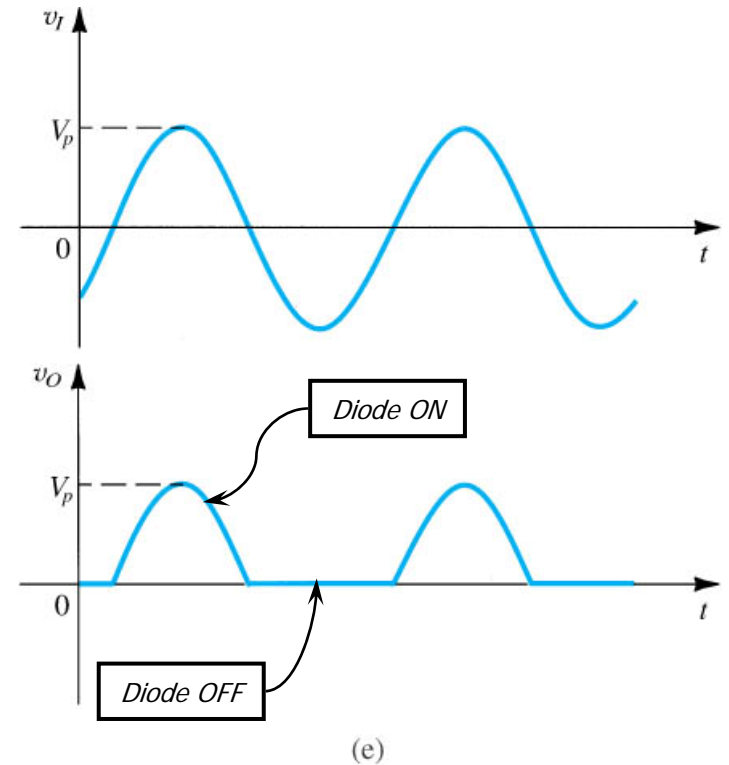
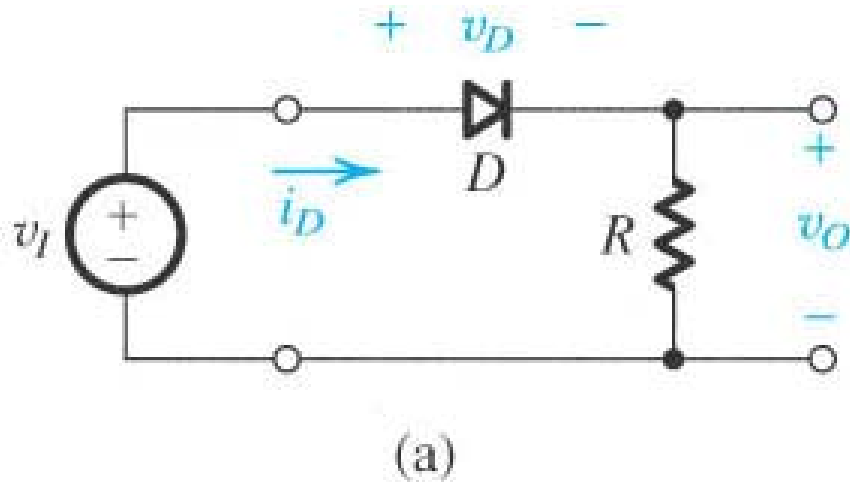


Diagramme bloc d'un circuit d'alimentation DC. Le circuit d'alimentation permet d'obtenir une tension DC aussi constante que possible, il est composé des blocs suivants :

- 1) Transformateur
- 2) Redresseur
- 3) Filtre
- 4) Régulateur de tension

Redresseur simple alternance



Redresseur simple alternance et la réponse du circuit dans le cas d'une diode idéale

Redresseur simple alternance

Calcul de la fonction de transfert

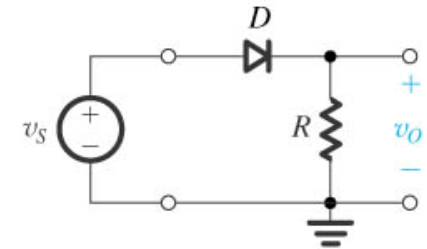
Pour $v_s \prec V_{D0}$, on a : $v_0 = 0$

Pour $v_s \succ V_{D0}$, on a :

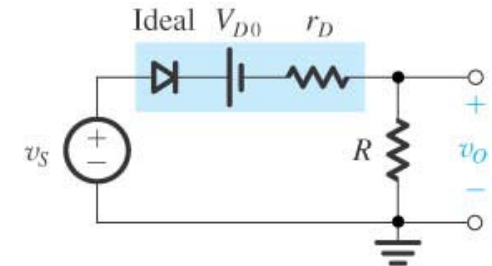
$$v_0 = \frac{R}{R + r_D} (v_s - V_{D0}) \quad (\text{Diviseur de tension})$$

Pour $R \square r_D$, on a :

$$v_0 \square v_s - V_{D0}$$

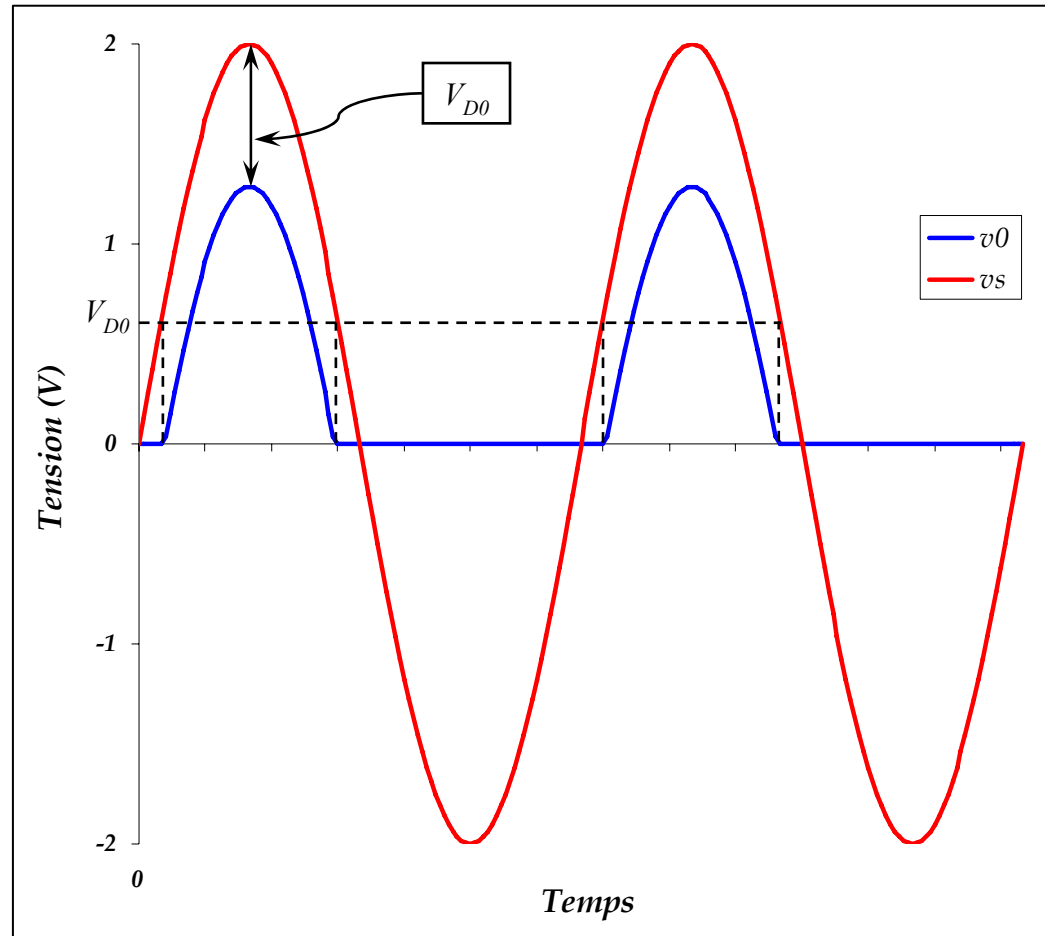


(a)



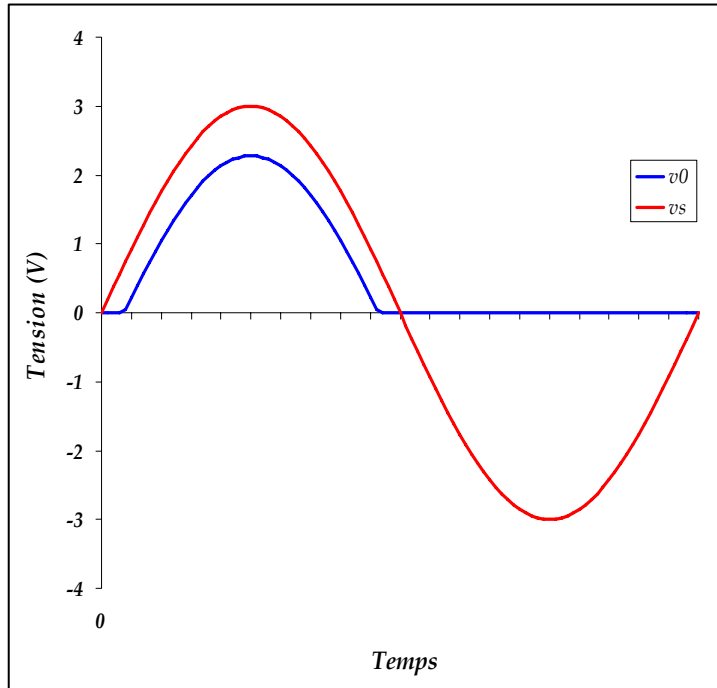
(b)

Redresseur simple alternance

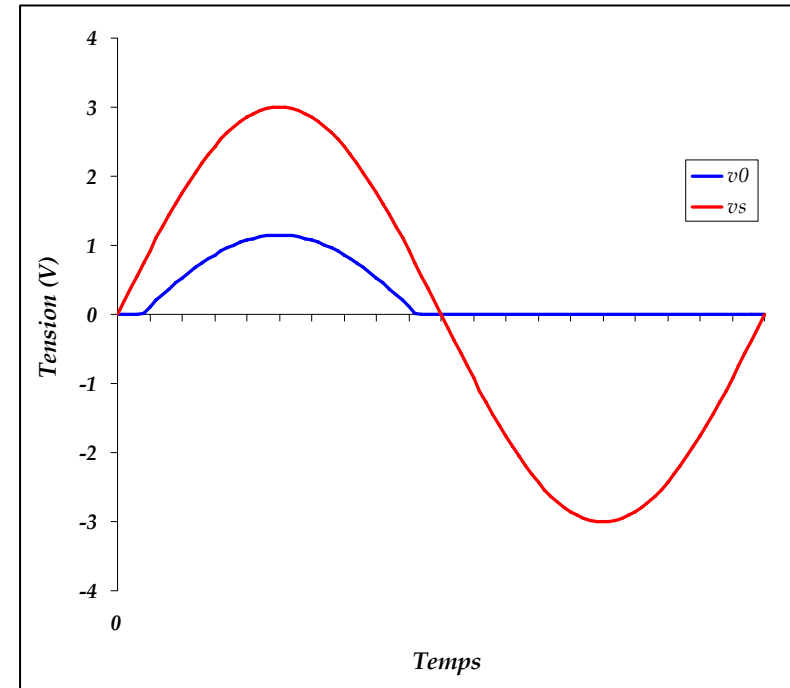


Signaux d'entrée et de sortie d'un redresseur simple alternance ($R \gg r_D$)

Redresseur simple alternance



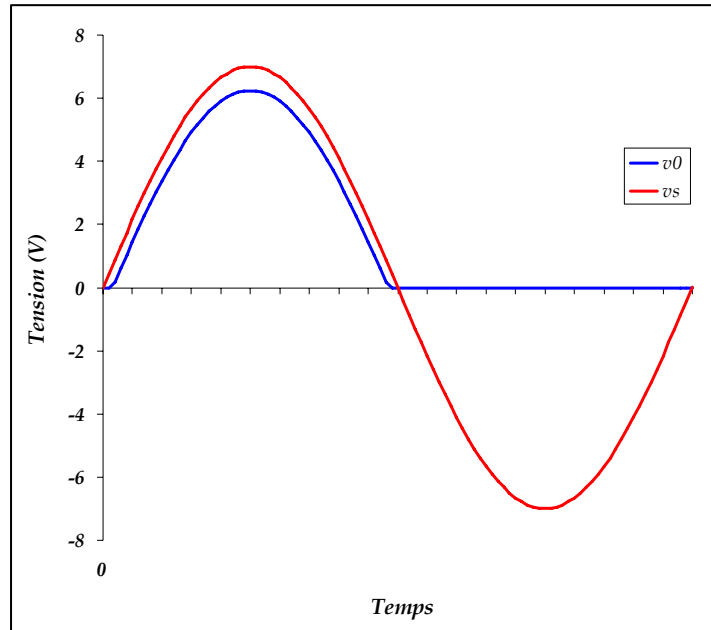
(a)



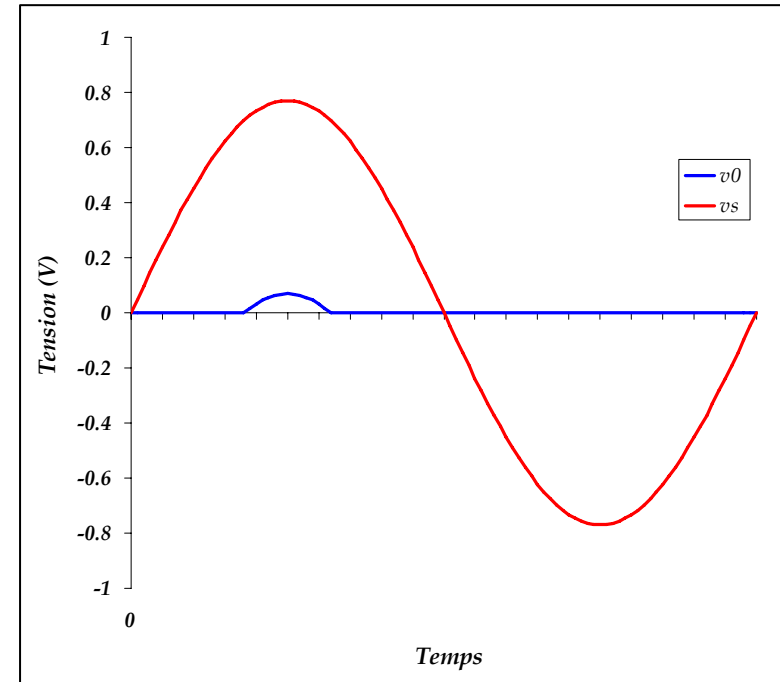
(b)

Signaux d'entrée et de sortie d'un redresseur simple alternance, a) pour $R = 100 \cdot r_D$ et b) pour $R = r_D$

Redresseur simple alternance



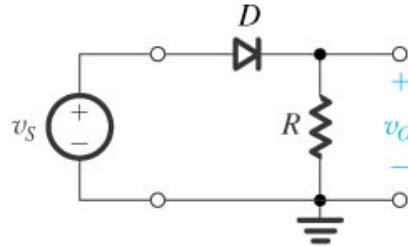
(a)



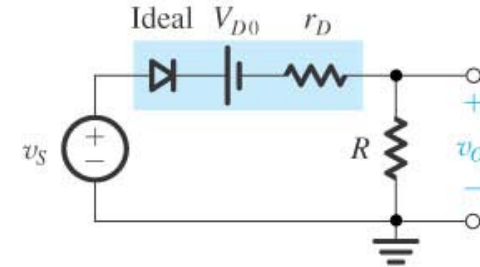
(b)

*Signaux d'entrée et de sortie d'un redresseur simple alternance, a) pour $V_s = 10 * V_{D0}$ et b) pour $V_s = 1.1 * V_{D0}$*

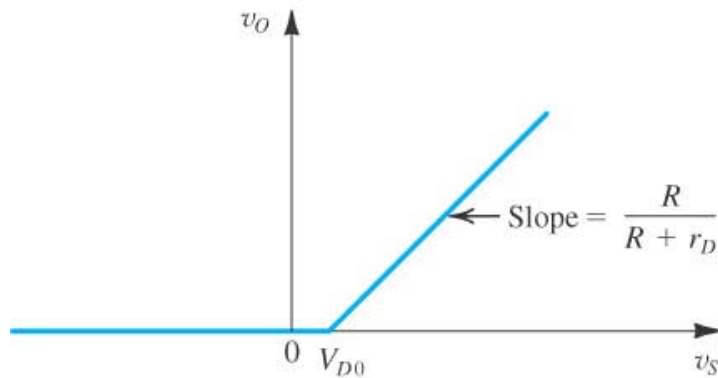
Redresseur simple alternance



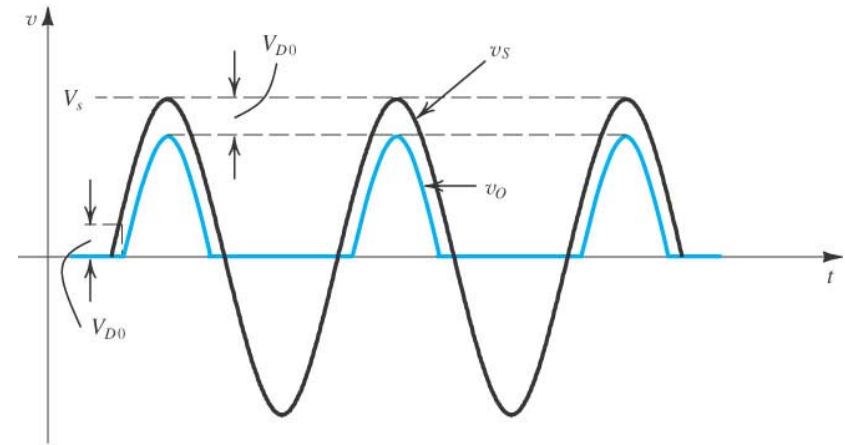
(a)



(b)



(c)



(d)

(a) Redresseur simple alternance, (b) circuit équivalent, (c) fonction de transfert du redresseur, et (d) signaux d'entrée et de sortie du circuit

Redresseur simple alternance

Caractéristiques importantes d'un redresseur

- ♦ la tension inverse de crête « Peak Inverse Voltage » (PIV)
- ♦ le courant maximum

Tension PIV

- ♦ C'est la tension inverse maximale aux bornes de la diode pour laquelle celle-ci demeure bloqué mais n'entre pas dans la région de cassure

Courant maximum

- ♦ C'est la valeur maximum du courant en polarisation directe que la diode peut supporter

Redresseur simple alternance

Exemple d'un redresseur simple alternance

Soit le redresseur simple alternance composé d'une diode en série avec une résistance $R=100\Omega$. On suppose que la diode possède un $V_{DO}=0,7V$ et une résistance r_D négligeable devant R et que l'entrée est un signal sinusoïdal de $12V$ (rms)

- a) Quel est l'angle total de conduction ?
- b) Calculer la valeur moyenne de la tension de sortie v_o
- c) Quel est le courant maximum passant dans la diode ?
- d) Quelle doit être la tension PIV de la diode ?

Redresseur simple alternance

Exemple d'un redresseur simple alternance

a) Calcul de l'angle total de conduction

Le signal d'entrée est : $v_s(t) = V_s \sin(\theta(t))$

La diode conduit pour : $v_s(t) \succ V_{D0}$

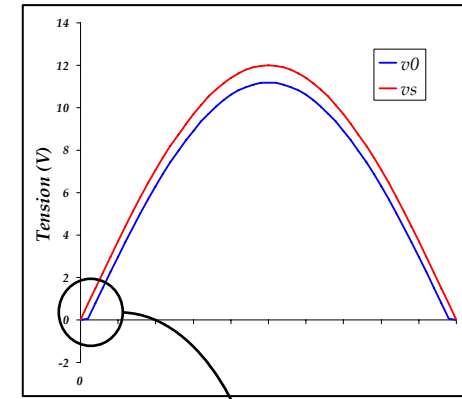
$$\Rightarrow \sin(\theta(t)) \succ \frac{V_{D0}}{V_s}$$

$$\Rightarrow \sin^{-1}\left(\frac{V_{D0}}{V_s}\right) \prec \theta(t) \prec \pi - \sin^{-1}\left(\frac{V_{D0}}{V_s}\right)$$

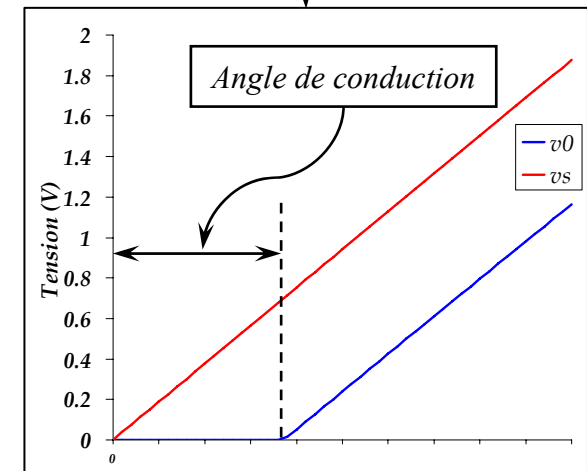
$$\Rightarrow \sin^{-1}\left(\frac{0.7}{12\sqrt{2}}\right) \prec \theta(t) \prec \pi - \sin^{-1}\left(\frac{0.7}{12\sqrt{2}}\right)$$

$$\Rightarrow \sin^{-1}(0.041) \prec \theta(t) \prec \pi - \sin^{-1}(0.041)$$

$$\Rightarrow \theta_c = 2.35^\circ \prec \theta(t) \prec 177.65^\circ$$



Zoom



Redresseur simple alternance

Exemple d'un redresseur simple alternance

b) Calcul de la valeur moyenne de la tension de sortie v_o

Le signal d'entrée est : $v_s = V_s \sin(\theta) = \sqrt{2}V_{s_rms} \sin(\theta)$

Le signal de sortie est : $v_o = \begin{cases} 0 & (v_s \leq V_{D0}) \\ v_s - V_{D0} & (v_s \geq V_{D0}) \end{cases}$

$$V_{0moy} = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=0}^{2\pi} v_o(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=\theta_c}^{\pi-\theta_c} (v_s - V_{D0}) d\theta \quad \square \quad \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} (v_s - V_{D0}) d\theta$$

$$\Rightarrow V_{0moy} = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} (V_s \sin(\theta) - V_{D0}) d\theta = \frac{1}{2\pi} (2V_s - \pi V_{D0})$$

$$\Rightarrow V_{0moy} = \frac{V_s}{\pi} - \frac{V_{D0}}{2} = 5.05V$$

Redresseur simple alternance

Exemple d'un redresseur simple alternance

c) Calcul du courant maximum passant dans la diode

$$I_{\max} = \frac{V_{s_crête} - V_{D0}}{R} = \frac{\sqrt{2} \times V_{s_rms} - V_{D0}}{R}$$

$$\Rightarrow I_{\max} = \frac{12\sqrt{2} - 0.7}{100} = 163mA$$

d) Calcul de la tension PIV de la diode

$$(Tension_inverse)_{D\ OFF} = v_0 - v_s = 0 - v_s = -v_s$$

$$PIV = (Tension_inv)_{D\ OFF, v_s = -V_s} = V_s = \sqrt{2}V_{s_rms} = 12\sqrt{2} = 17V$$

Il est recommandé de choisir $PIV = 2 \times V_s = 34V$

Redresseur simple alternance

Tension moyenne

- ♦ La tension moyenne est donnée par :

- ❖ $V_{moy} = (V_s/\pi) - (V_{D0}/2)$

Tension PIV

- ♦ La tension PIV de la diode est :

- ❖ $PIV = V_s$

Courant maximum

- ♦ Le courant maximum est donné par :

- ❖ $I_{max} = (V_s - V_{D0})/R$

Redresseur double alternance

Contrairement au redresseur simple alternance qui utilise une seule alternance du signal sinusoïdal pour générer la tension DC, le redresseur double alternance utilise les deux alternances de la sinusoïde

Deux implémentations

- ♦ Circuit redresseur plein onde avec prise médiane
- ♦ Circuit redresseur en pont

Redresseur pleine onde

Première implémentation du circuit redresseur double alternance est donnée par le circuit ci-contre

$$v_s \geq V_{D0} \Rightarrow D1 \text{ conduit et } D2 \text{ bloquée}$$

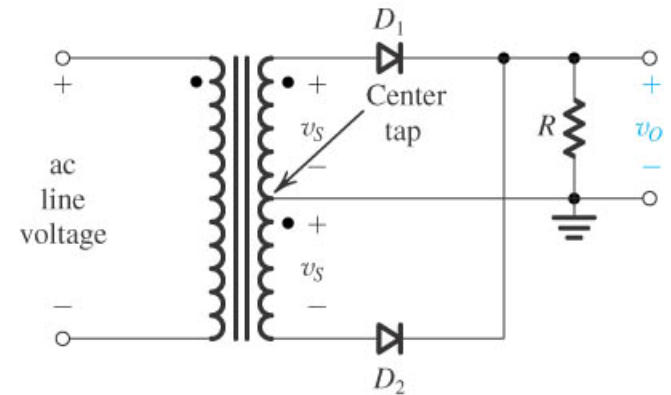
$$\Rightarrow v_0 = v_s - V_{D0} \quad (R \gg r_D)$$

$$v_s \leq -V_{D0} \Rightarrow D2 \text{ conduit et } D1 \text{ bloquée}$$

$$\Rightarrow v_0 = -v_s - V_{D0} \quad (R \gg r_D)$$

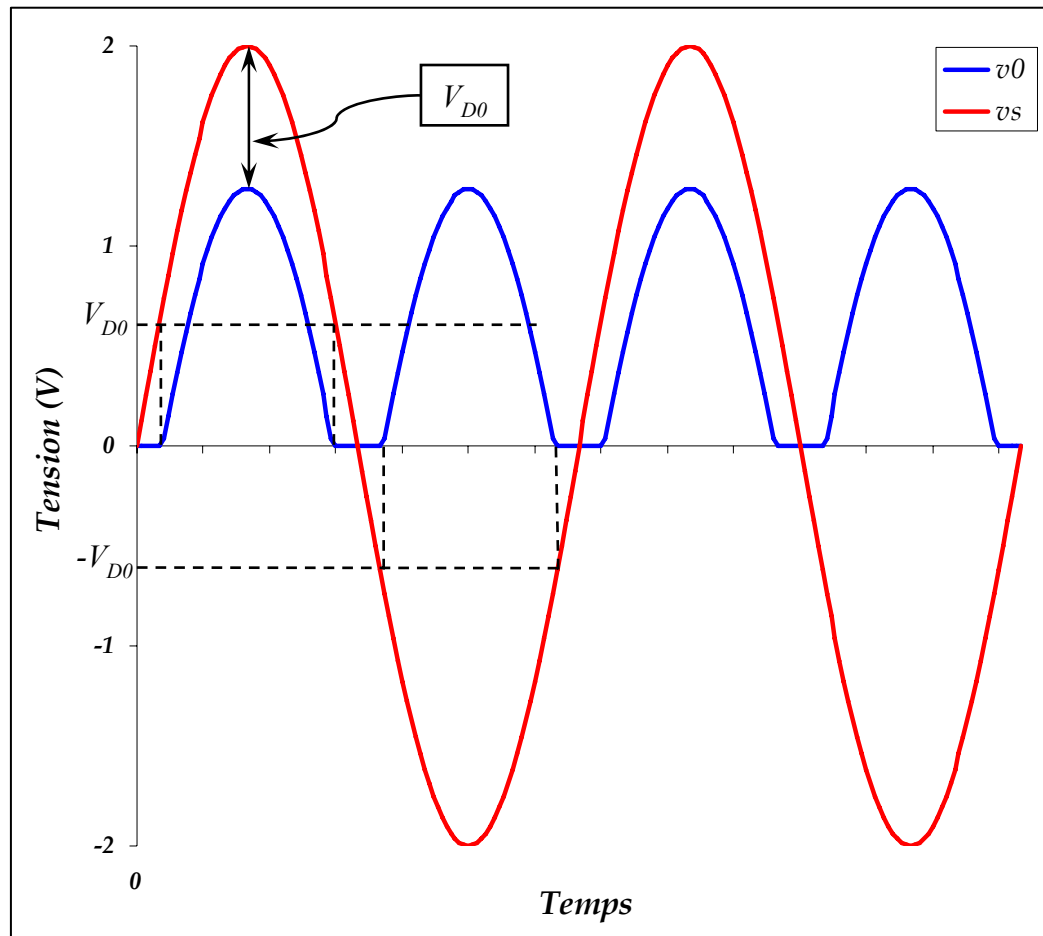
$$-V_{D0} \leq v_s \leq V_{D0} \Rightarrow D1 \text{ et } D2 \text{ bloquées}$$

$$\Rightarrow v_0 = 0$$



Redresseur double alternance pleine onde

Redresseur pleine onde



Signaux d'entrée et de sortie d'un redresseur double alternance plein onde ($R \gg r_D$)

Redresseur pleine onde

Exemple d'un redresseur pleine onde

Soit le redresseur pleine onde vu précédemment. On suppose que les deux diodes possèdent un $V_{DO}=0,7V$ et une résistance r_D négligeable devant $R=100\Omega$ et que l'entrée est un signal sinusoïdal de $12V$ (rms)

- a) Quel est le % de la période de la sinusoïde d'entrée pendant lequel l'une ou l'autre des diodes conduit ?
- b) Quelle est la tension moyenne DC à la sortie ?
- c) Quel est le courant maximum passant dans chaque diode ?
- d) Quelle est la tension PIV que doit supporter chaque diode ?

Redresseur pleine onde

Exemple d'un redresseur pleine onde

a) Calcul du % de la période

Le signal d'entrée est : $v_s(t) = V_s \sin(\theta) = \sqrt{2}V_{s_rms} \sin(\theta)$

La diode D_1 conduit pour : $v_s(t) \succ V_{D0}$

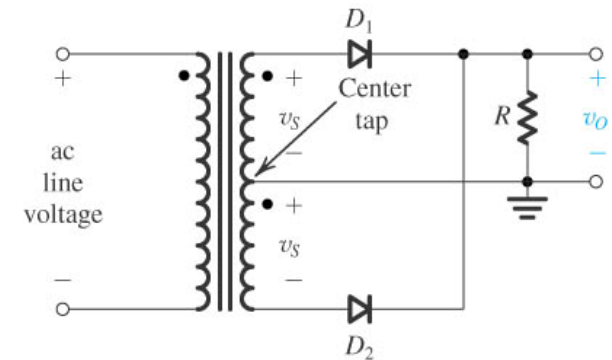
$$\Rightarrow \theta_c \prec \theta \prec \pi - \theta_c \quad (\theta_c = 0.041 \text{ rd})$$

La diode D_2 conduit pour : $v_s(t) \prec -V_{D0}$

$$\Rightarrow \pi + \theta_c \prec \theta \prec 2\pi - \theta_c$$

Le % de la période est :

$$\frac{2(\pi - 2\theta_c)}{2\pi} \times 100 = 97.4\%$$



(a)
Microelectronic Circuits – Fifth Edition
Copyright © 2004 by Oxford University Press, Inc.

Redresseur pleine onde

Exemple d'un redresseur pleine onde

b) Calcul de la tension moyenne DC à la sortie de sortie

Le signal d'entrée est : $v_s = V_s \sin(\theta) = \sqrt{2}V_{s_rms} \sin(\theta)$

Le signal de sortie est :
$$v_0 = \begin{cases} v_s - V_{D0} & (v_s \geq V_{D0}) \\ -v_s - V_{D0} & (v_s \leq -V_{D0}) \\ 0 & (-V_{D0} \leq v_s \leq V_{D0}) \end{cases}$$

$$V_{0moy} = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} (v_s - V_{D0}) d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=\pi}^{2\pi} (-v_s - V_{D0}) d\theta$$

$$\Rightarrow V_{0moy} = 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} (v_s - V_{D0}) d\theta = \frac{2\sqrt{2}V_{s_rms}}{\pi} - V_{D0} = 10.1V$$

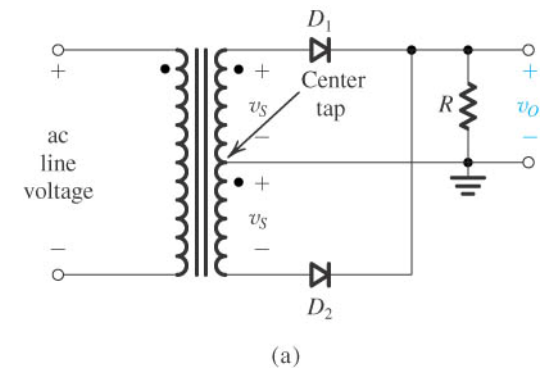
Redresseur pleine onde

Exemple d'un redresseur pleine onde

c) Calcul du courant maximum passant dans chaque diode

$$I_{\max} = \frac{V_s - V_{D0}}{R} = \frac{\sqrt{2} \times V_{s_rms} - V_{D0}}{R}$$

$$\Rightarrow I_{\max} = \frac{12\sqrt{2} - 0.7}{100} = 163mA$$



d) Calcul de la tension PIV de chaque diode

$$(Tension_inverse_{D1})_{D1\ OFF} = v_0 - v_s = (-v_s - V_{D0}) - v_s$$

$$PIV_{D1} = (Tension_inverse_{D1})_{D1\ OFF, v_s = -V_s} = (V_s - V_{D0}) - (-V_s)$$

$$\Rightarrow PIV_{D1} = PIV_{D2} = 2V_s - V_{D0} = 33.2V$$

Redresseur pleine onde

Tension moyenne

- ♦ La tension moyenne pour un signal redressé plein onde est deux fois plus grande que celle obtenu avec un redresseur demi-onde
 - ❖ $V_{moy} = (2V_s/\pi) - V_{D0}$

Tension PIV

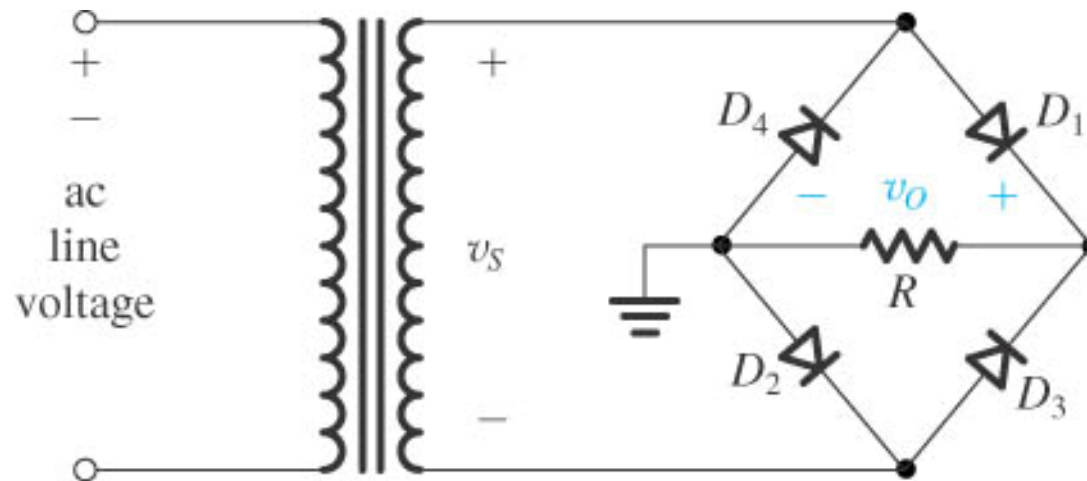
- ♦ La tension PIV des deux diodes est pratiquement deux fois plus que pour le redresseur simple alternance
 - ❖ $PIV = 2V_s - V_{D0}$

Courant maximum

- ♦ Le courant maximum est le même que pour le redresseur simple alternance
 - ❖ $I_{max} = (V_s - V_{D0})/R$

Redresseur en pont

Deuxième implémentation du circuit redresseur double alternance est le redresseur en pont réalisé par le circuit suivant :



Redresseur double alternance en pont

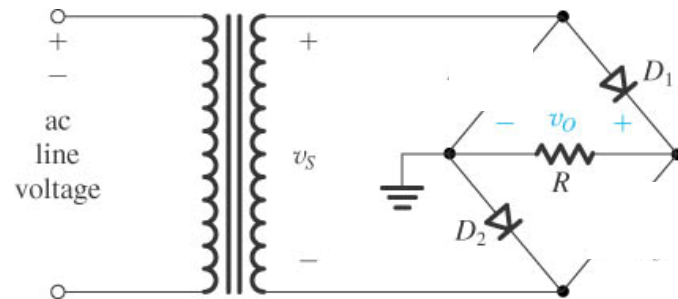
Redresseur en pont

Fonctionnement du redresseur en pont

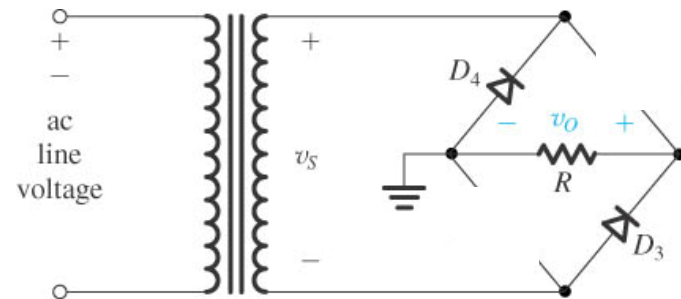
$$v_s \geq 2V_{D0} \Rightarrow D_1, D_2 \text{ ON et } D_3, D_4 \text{ OFF} \Rightarrow v_0 \approx v_s - 2V_{D0} \quad (R \gg r_D)$$

$$v_s \leq -2V_{D0} \Rightarrow D_1, D_2 \text{ OFF et } D_3, D_4 \text{ ON} \Rightarrow v_0 \approx -v_s - 2V_{D0} \quad (R \gg r_D)$$

$$-2V_{D0} \leq v_s \leq 2V_{D0} \Rightarrow D_1, D_2, D_3 \text{ et } D_4 \text{ OFF} \Rightarrow v_0 = 0$$

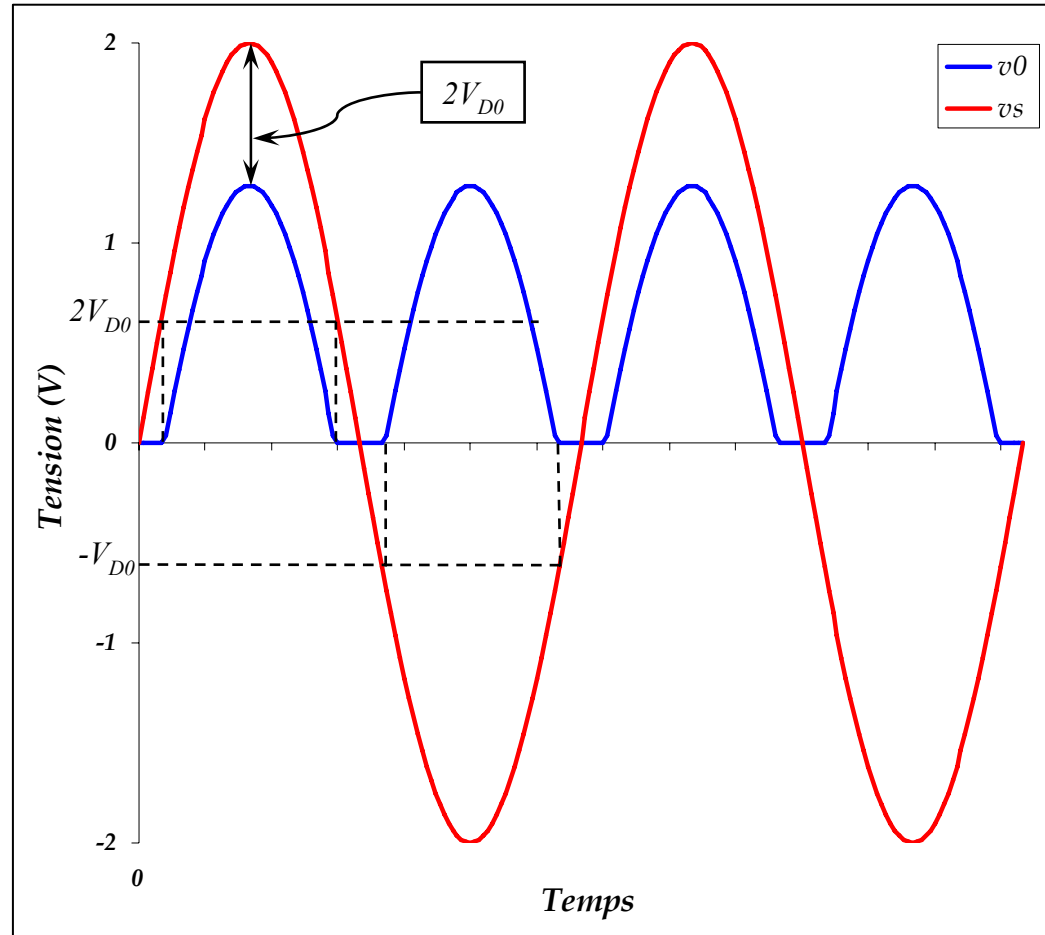


Alternance positive



Alternance négative

Redresseur en pont



Signaux d'entrée et de sortie d'un redresseur en pont ($R \gg r_D$)

Redresseur en pont

Exemple d'un redresseur en pont

Soit le redresseur pleine onde vu précédemment. On suppose que toutes les diodes possèdent un $V_{DO}=0,7V$ et une résistance r_D négligeable devant $R=100\Omega$ et que l'entrée est un signal sinusoïdal de $12V$ (rms)

- a) Quelle est la tension moyenne DC à la sortie ?
- b) Quel est le courant maximum passant dans chaque diode ?
- c) Quelle est la tension PIV que doit supporter chaque diode ?

Redresseur en pont

Exemple d'un redresseur en pont

a) Calcul de la tension moyenne DC à la sortie de sortie

Le signal d'entrée est : $v_s = V_s \sin(\theta) = \sqrt{2}V_{s_rms} \sin(\theta)$

Le signal de sortie est : $v_o = \begin{cases} v_s - 2V_{D0} & (v_s \geq 2V_{D0}) \\ -v_s - 2V_{D0} & (v_s \leq -2V_{D0}) \\ 0 & (-2V_{D0} \leq v_s \leq 2V_{D0}) \end{cases}$

$$V_{0moy} = \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} (v_s - 2V_{D0}) d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=\pi}^{2\pi} (-v_s - 2V_{D0}) d\theta$$

$$\Rightarrow V_{0moy} = 2 \times \frac{1}{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} (v_s - 2V_{D0}) d\theta = \frac{2\sqrt{2}V_{s_rms}}{\pi} - 2V_{D0} = 9.4V$$

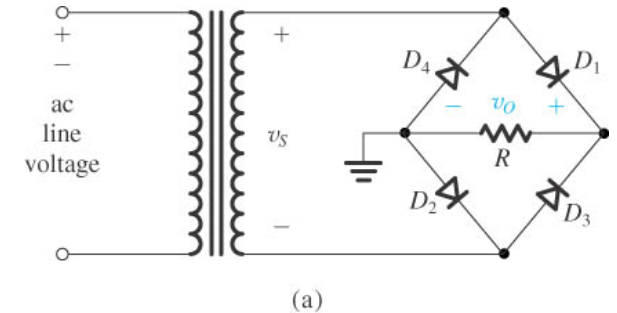
Redresseur en pont

Exemple d'un redresseur en pont

b) Calcul du courant maximum passant dans chaque diode

$$I_{\max} = \frac{V_s - 2V_{D0}}{R} = \frac{\sqrt{2} \times V_{s_rms} - 2V_{D0}}{R}$$

$$\Rightarrow I_{\max} = \frac{12\sqrt{2} - 1.4}{100} = 156mA$$



c) Calcul de la tension PIV de chaque diode

$$(Tension_inverse_{D1})_{D1\ OFF} = v_0 - v_{anode} = -v_s - v_{D03}$$

$$PIV_{D1} = (Tension_inverse_{D1})_{D1\ OFF, v_s = -V_s} = V_s - V_{D0}$$

$$\Rightarrow PIV_{D1} = PIV_{D2} = PIV_{D3} = PIV_{D4} = 2V_s - V_{D0} = 16.3V$$

Redresseur en pont

Caractéristiques

- ♦ La tension moyenne est :
 - ❖ $V_{moy} = (2V_s/\pi) - 2V_{D0}$
- ♦ Le courant maximum dans les diodes est :
 - ❖ $I_{max} = (V_s - 2V_{D0})/R$
- ♦ La tension PIV des diodes est :
 - ❖ $PIV = V_s - V_{D0}$

Redresseur en pont vs. redresseur pleine onde

- ♦ Moins de diodes pour le redresseur pleine onde
- ♦ Pas de prise médiane pour le redresseur en pont
- ♦ PIV deux fois plus faible pour le redresseur en pont

Comparaison des redresseurs

	Simple alternance	Pleine onde	Pont
# diodes	1	2	4
Tension crête	$V_{s_crête} - V_{D0}$	$V_{s_crête} - V_{D0}$	$V_{s_crête} - 2V_{D0}$
Tension DC moyenne	$(V_{s_crête}/\pi) - V_{D0}/2$	$(2 \cdot V_{s_crête}/\pi) - V_{D0}$	$(2 \cdot V_{s_crête}/\pi) - 2 \cdot V_{D0}$
Courant max	$(V_{s_crête} - V_{D0})/R$	$(V_{s_crête} - V_{D0})/R$	$(V_{s_crête} - 2 \cdot V_{D0})/R$
PIV	$V_{s_crête}$	$2 \cdot V_{s_crête} - V_{D0}$	$V_{s_crête} - V_{D0}$
Fréquence d'ondulation	f	2f	2f

Comparaison des trois circuits redresseurs ($R \gg r_D$)

Redresseur avec filtre

Problématique

- ♦ Les tensions de sortie des redresseur vus précédemment ne permettent pas d'alimenter les circuits électroniques qui requièrent une tension DC constante

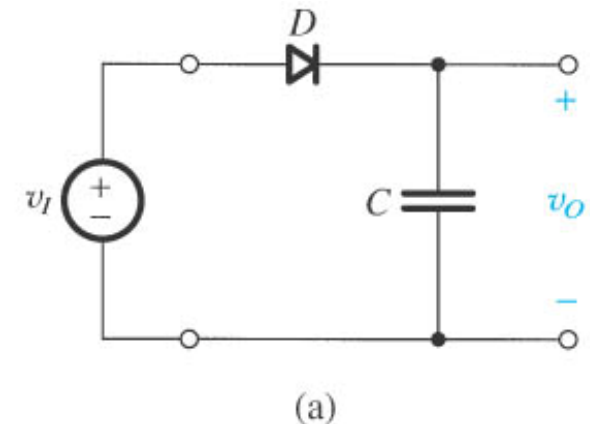
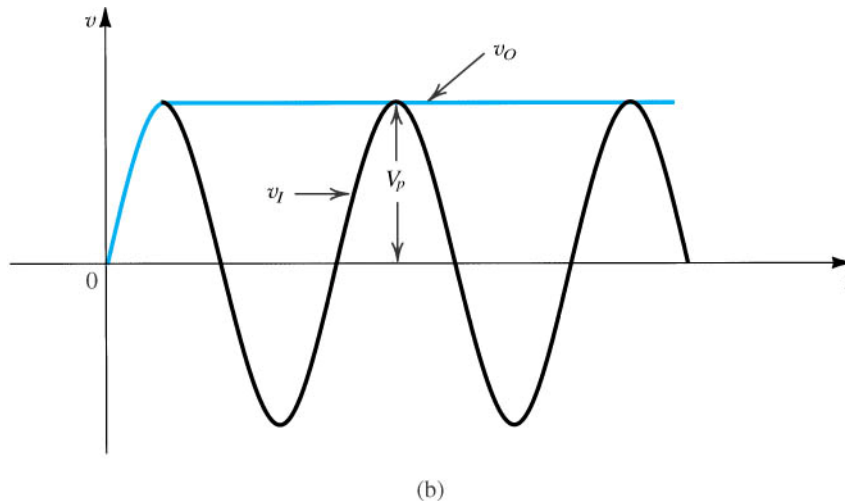
Solution

- ♦ La technique la plus simple pour réduire les variations de la tension de sortie du redresseur est d'utiliser une capacité en parallèle avec la résistance de charge

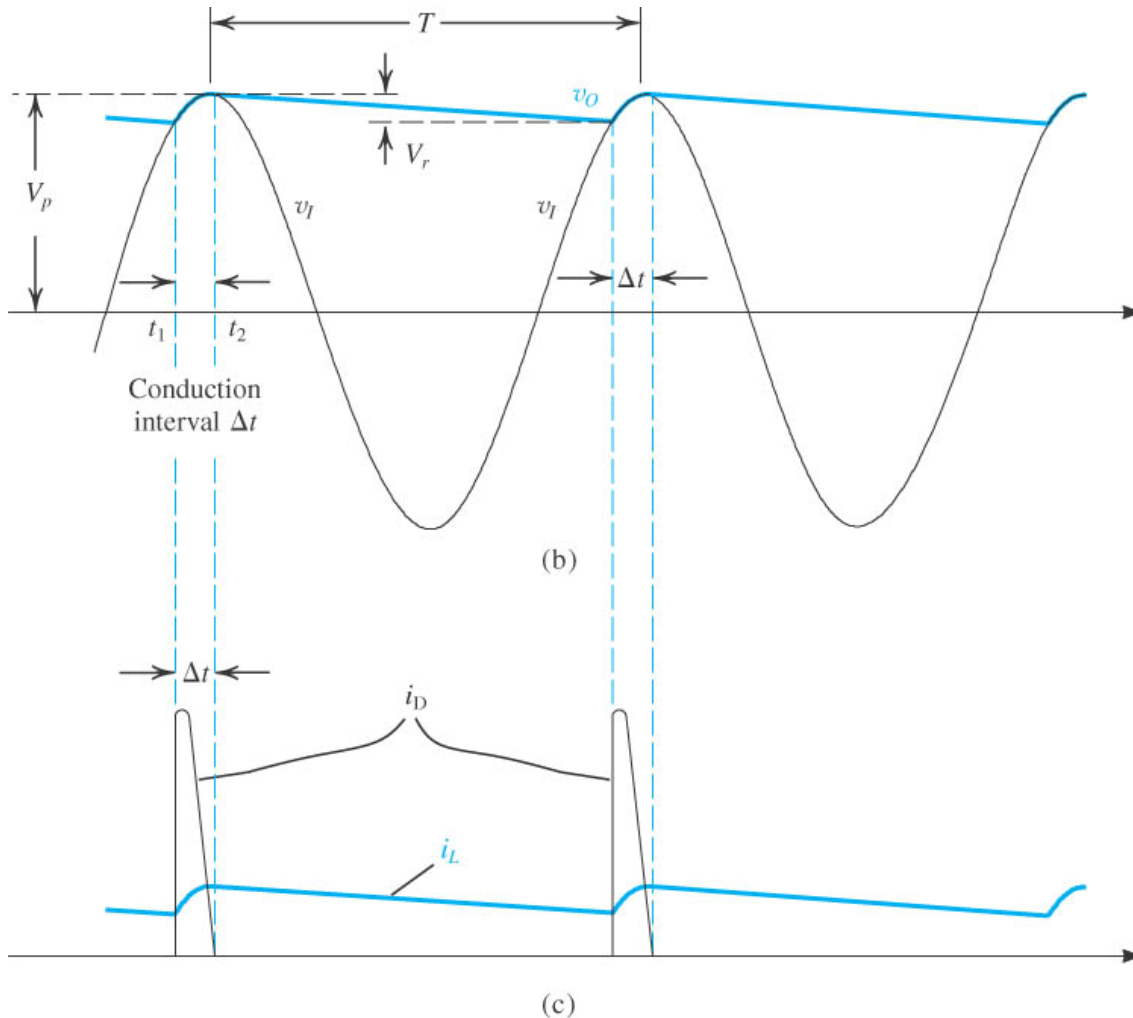
Redresseur avec filtre

Cas du redresseur simple alternance avec filtre

- ◆ Sans résistance de charge
- ◆ Diode idéale



Redresseur avec filtre



Fonctionnement du redresseur simple alternance avec filtre et avec une résistance de charge,
a) Circuit
b) Courbes des tensions
c) Courbes des courant

Redresseur avec filtre

Remarques:

- ♦ Pour que le circuit fonctionne correctement, il faut que la période $T \ll RC$
- ♦ La diode conduit pendant un intervalle Δt
- ♦ La capacité se décharge lentement lorsque la diode est OFF ($T - \Delta t$) et récupère sa charge lorsque la diode est ON (Δt)
- ♦ On suppose que $\Delta t \ll T$ de façon à considérer que le temps de décharge est $\approx T$
- ♦ La tension de sortie varie entre la tension crête V_p et la tension ($V_p - V_r$)
- ♦ V_r est la tension d'ondulation (ronflement) et on a $V_r \ll V_p$

Redresseur avec filtre

Cas du redresseur simple alternance avec filtre

- ♦ Calcul de la tension d'ondulation V_r

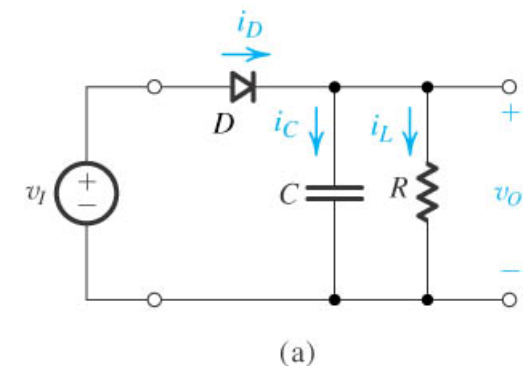
$$v_0 = \begin{cases} v_I & \text{pour } v_I \succ V_r \\ V_p e^{-t/RC} & \text{pour } v_I \prec V_r \end{cases} \quad V_r : \text{tension d'ondulation}$$

La valeur de V_r est tel que : $V_p e^{-T/RC} = V_p - V_r$

Pour $T \ll RC$ on a : $V_p e^{-T/RC} \approx V_p (1 - \frac{T}{RC})$

$$V_p (1 - \frac{T}{RC}) \approx V_p - V_r$$

$$\Rightarrow V_r = V_p \frac{T}{RC} = V_p \frac{1}{fRC}$$



Redresseur avec filtre

Cas du redresseur simple alternance avec filtre

- ♦ Calcul de l'angle de conduction

Soit $\theta_c = \omega \Delta t$ l'angle de conduction

$$\text{On a : } V_p - V_r = V_p \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) = V_p \cos(\theta_c)$$

$$\text{Pour } \theta_c \text{ petit : } \cos(\theta_c) = 1 - \frac{\theta_c^2}{2}$$

$$\Rightarrow V_p - V_r = V_p - V_p \frac{\theta_c^2}{2} \Rightarrow \theta_c = \omega \Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}$$

$$\text{Le temps de conduction est : } \Delta t = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}$$

Redresseur avec filtre

Cas du redresseur simple alternance avec filtre

- ♦ Calcul du courant moyen traversant la diode

$$\text{On a : } i_D = i_C + i_L \Rightarrow i_{D\text{moy}} = i_{C\text{moy}} + i_{L\text{moy}}$$

$$i_C = C \frac{dv_o}{dt} = C \frac{dv_i}{dt} \Rightarrow i_{C\text{moy}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\theta=\frac{\pi}{2}-\theta_c}^{\frac{\pi}{2}} C \frac{dv_i}{dt} dt = \frac{C}{\Delta t} \left[v_i\left(\frac{\pi}{2}\right) - v_i\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) \right]$$

$$v_i = V_p \sin(\theta) \Rightarrow i_{C\text{moy}} = \frac{C}{\Delta t} [V_p - (V_p - V_r)] = \frac{CV_r}{\Delta t}$$

$$i_L = \frac{v_o}{R} = \frac{v_i}{R} \Rightarrow i_{L\text{moy}} = \frac{1}{\Delta t} \int_{\theta=\frac{\pi}{2}-\theta_c}^{\frac{\pi}{2}} \frac{v_i}{R} dt = \frac{V_p}{\omega \Delta t R} \sin(\theta_c) \square \frac{V_p \theta_c}{\omega \Delta t R} = \frac{V_p}{R}$$

$$\text{On a : } \theta_c = \omega \Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}} \quad \text{et} \quad C = \frac{V_p}{V_r f R} \Rightarrow i_{D\text{moy}} = \frac{V_p}{R} \left(1 + \pi \sqrt{\frac{2V_p}{V_r}} \right)$$

Redresseur avec filtre

Cas du redresseur simple alternance avec filtre

- ♦ Calcul du courant moyen traversant la diode (2^{ème} méthode)

Soit Q_{ch} la charge fournie à travers la diode : $Q_{ch} = (i_{Dmoy} - i_{Lmoy})\Delta t$

Soit Q_{dech} la charge dissipée par R : $Q_{dech} = C\Delta V = CV_r$

$$Q_{ch} = Q_{dech} \Rightarrow (i_{Dmoy} - i_{Lmoy})\Delta t = CV_r$$

$$\text{On a : } \Delta t = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}, \quad i_{Lmoy} = \frac{V_p}{R} \quad \text{et} \quad C = \frac{V_p}{V_r f R}$$

$$\Rightarrow i_{Dmoy} = \frac{V_p}{R} \left(1 + \pi \sqrt{\frac{2V_p}{V_r}}\right)$$

Redresseur avec filtre

Cas du redresseur simple alternance avec filtre

- ♦ Calcul du courant maximum traversant la diode

Pendant la phase ON de la diode, on a : $i_D = C \frac{dv_i}{dt} + i_L$

$$v_i = V_p \sin(\omega t) \Rightarrow \frac{dv_i}{dt} = \omega V_p \cos(\omega t)$$

$$\left(\frac{dv_i}{dt}\right)_{\max} = \left(\frac{dv_i}{dt}\right)_{\omega t = \frac{\pi}{2} - \theta_c} = \omega V_p \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_c\right) = \omega V_p \sin(\theta_c) \approx \omega V_p \theta_c$$

$$i_L = \frac{v_i}{R} \Rightarrow i_{L(\omega t = \frac{\pi}{2} - \theta_c)} = \frac{V_p - V_r}{R} \approx \frac{V_p}{R} \Rightarrow i_{D\max} = C \omega V_p \theta_c + \frac{V_p}{R}$$

$$\text{On a : } \theta_c = \omega \Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}} \quad \text{et} \quad C = \frac{V_p}{V_r f R} \Rightarrow i_{D\max} = \frac{V_p}{R} \left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{2V_p}{V_r}}\right)$$

Redresseur avec filtre

Exemple d'un redresseur simple alternance avec filtre

Soit le redresseur simple alternance avec une capacité, on suppose qu'on a un signal sinusoïdal avec $f=60\text{Hz}$ et $V_p=100\text{V}$. On suppose qu'on a une résistance de charge $R=1\text{k}\Omega$. On suppose que la diode est idéale.

- a) Quelle est la valeur de la capacité qui donne $V_r=2\text{V}$?
- b) Quel est la fraction de période pendant laquelle la diode conduit ?
- c) Quel est le courant moyen traversant la diode ?
- d) Quel est le courant maximum traversant la diode ?

Redresseur avec filtre

Exemple d'un redresseur simple alternance avec filtre

a) Calcul de la valeur de la capacité qui donne $V_r = 2V$

$$V_r = \frac{V_p}{fRC} \Rightarrow C = \frac{V_p}{V_r fR} = \frac{100}{2 \times 60 \times 10^4} = 83.3 \mu F$$

b) Calcul de la fraction de période

$$\text{On a : } \theta_c = \omega \Delta t = \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 2}{100}} = 0.2 \text{ rad}$$

$$\Rightarrow \text{La fraction est : } \frac{\theta_c}{2\pi} = \frac{0.2}{2\pi} = 3.18\%$$

Redresseur avec filtre

Exemple d'un redresseur simple alternance avec filtre

c) Calcul du courant moyen traversant la diode

$$i_{Dmoy} = \frac{V_p}{R} \left(1 + \pi \sqrt{\frac{2V_p}{V_r}}\right) = 10^{-2} \times (1 + \pi \sqrt{100}) = 324mA$$

d) Calcul du courant maximum traversant la diode

$$i_{Dmoy} = \frac{V_p}{R} \left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{2V_p}{V_r}}\right) = 10^{-2} \times (1 + 2\pi \sqrt{100}) = 638mA$$

Superdiode

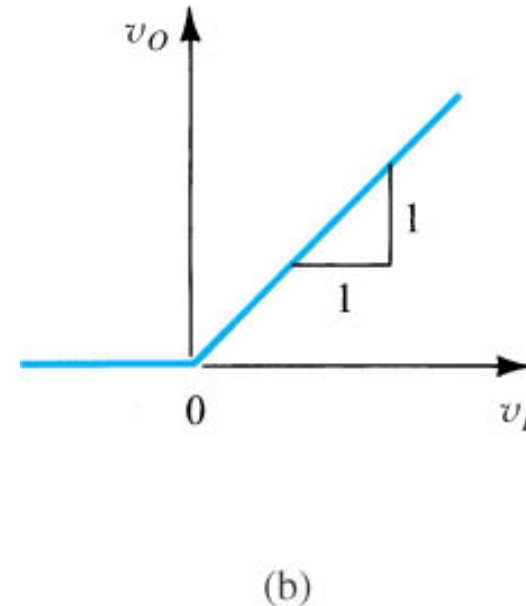
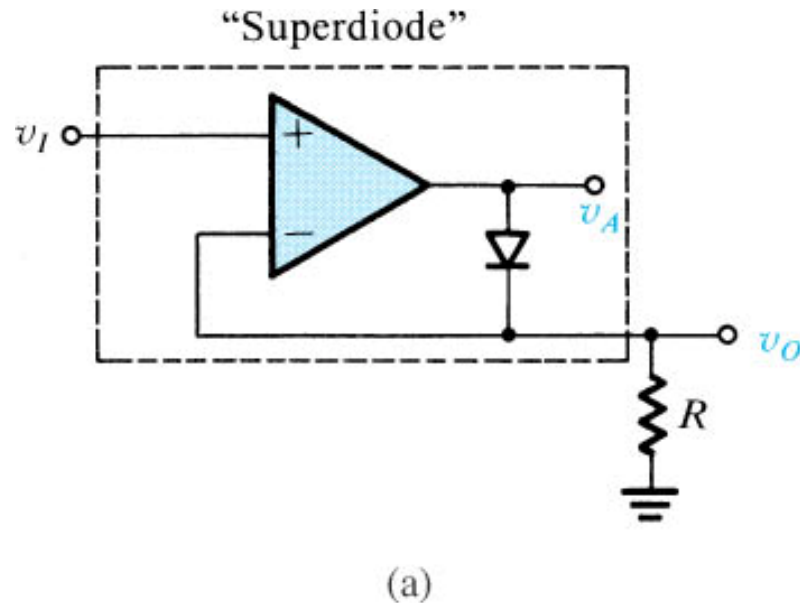
Problématique :

- ♦ Les applications des diodes (redresseur, ecrêteur, ...etc.) ne fonctionnent pas si le signal à traiter a une amplitude plus faible que la tension de polarisation en directe d'une diode normale

Solution : superdiode

- ♦ Il faut utiliser un redresseur de précision (superdiode)

Superdiode



*Redresseur simple alternance avec superdiode, a) circuit et
b) fonction de transfert du redresseur*

Autres applications des diodes

Écrêteur

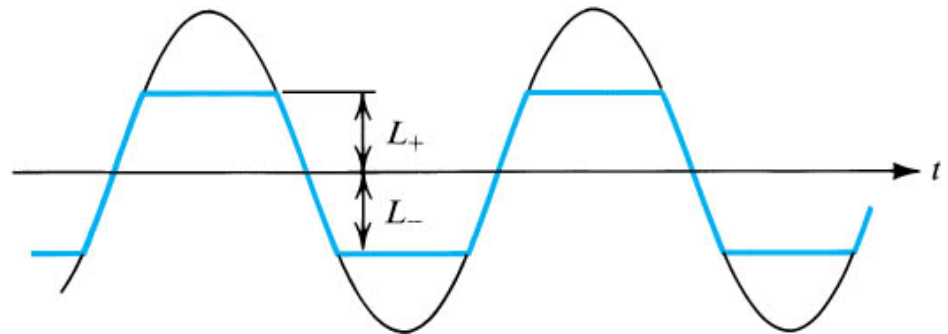
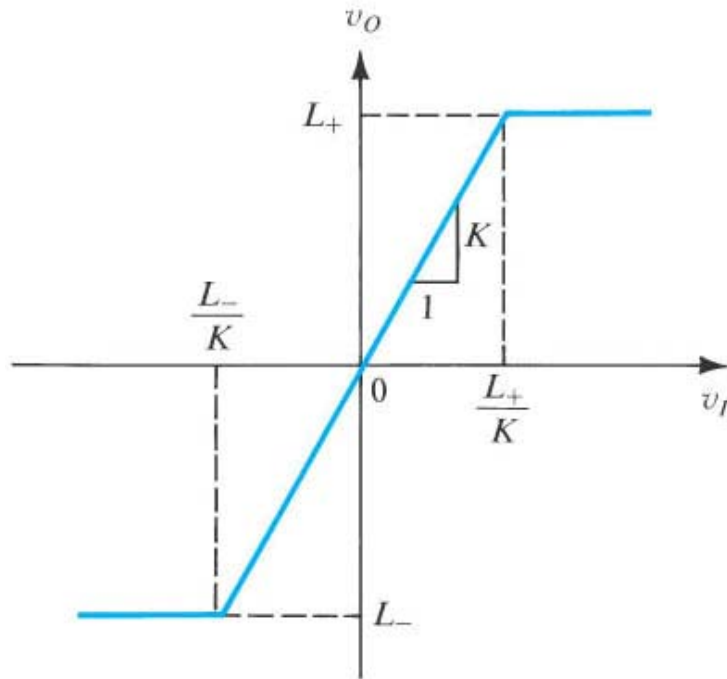
- ◆ Permet d'éliminer une partie du signal d'entrée tout en laissant passer le signal le reste du temps
 - ❖ Limiter l'amplitude
 - ❖ Permettre la transmission d'une partie de l'onde

Verrouilleur

- ◆ Permet de changer à la hausse ou à la baisse, la valeur moyenne de la composante continue de l'onde d'entrée.

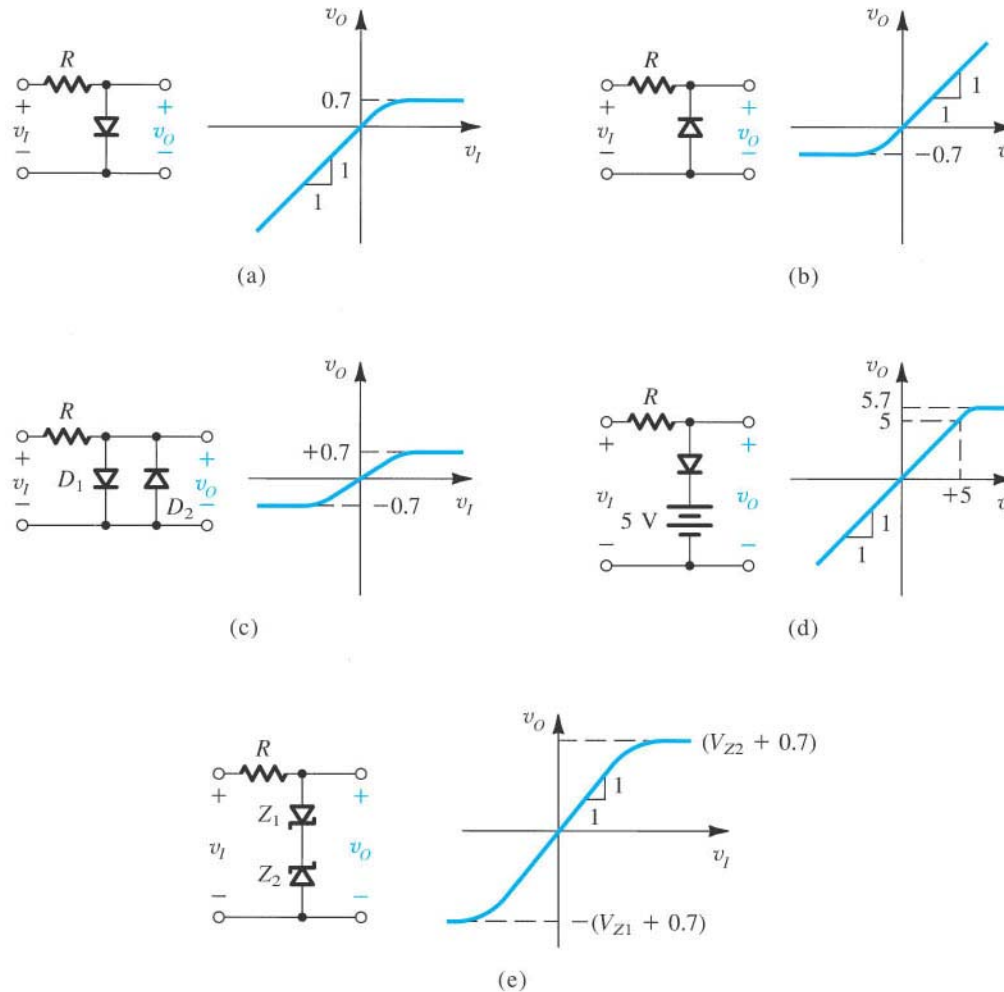
Multiplicateur de tensions

Écrêteur



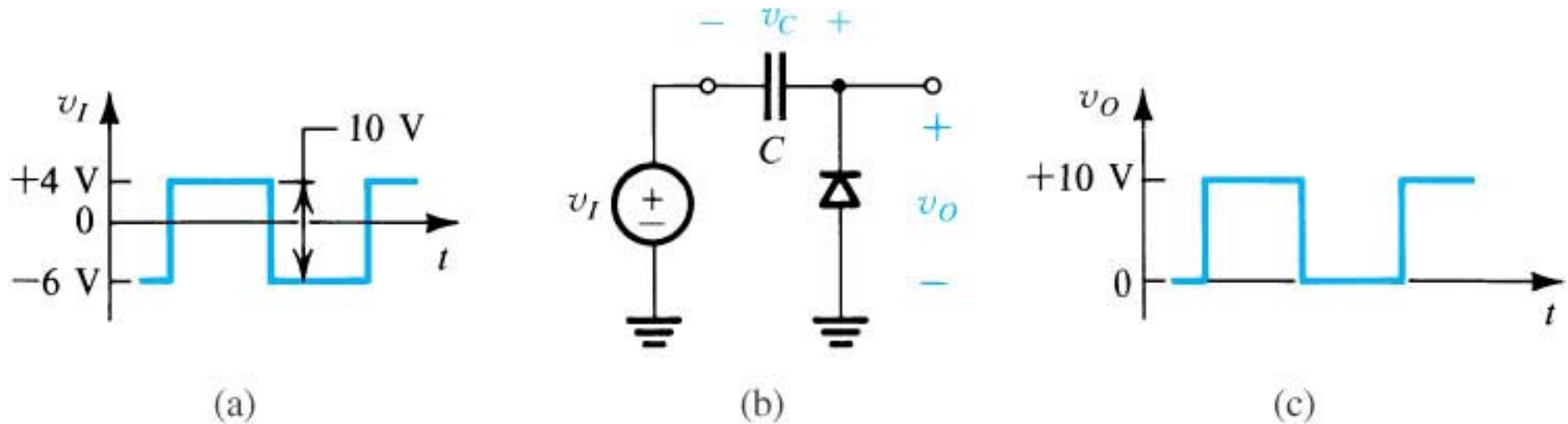
*Redresseur simple alternance avec superdiode, a) circuit et
b) fonction de transfert du redresseur*

Écrêteur



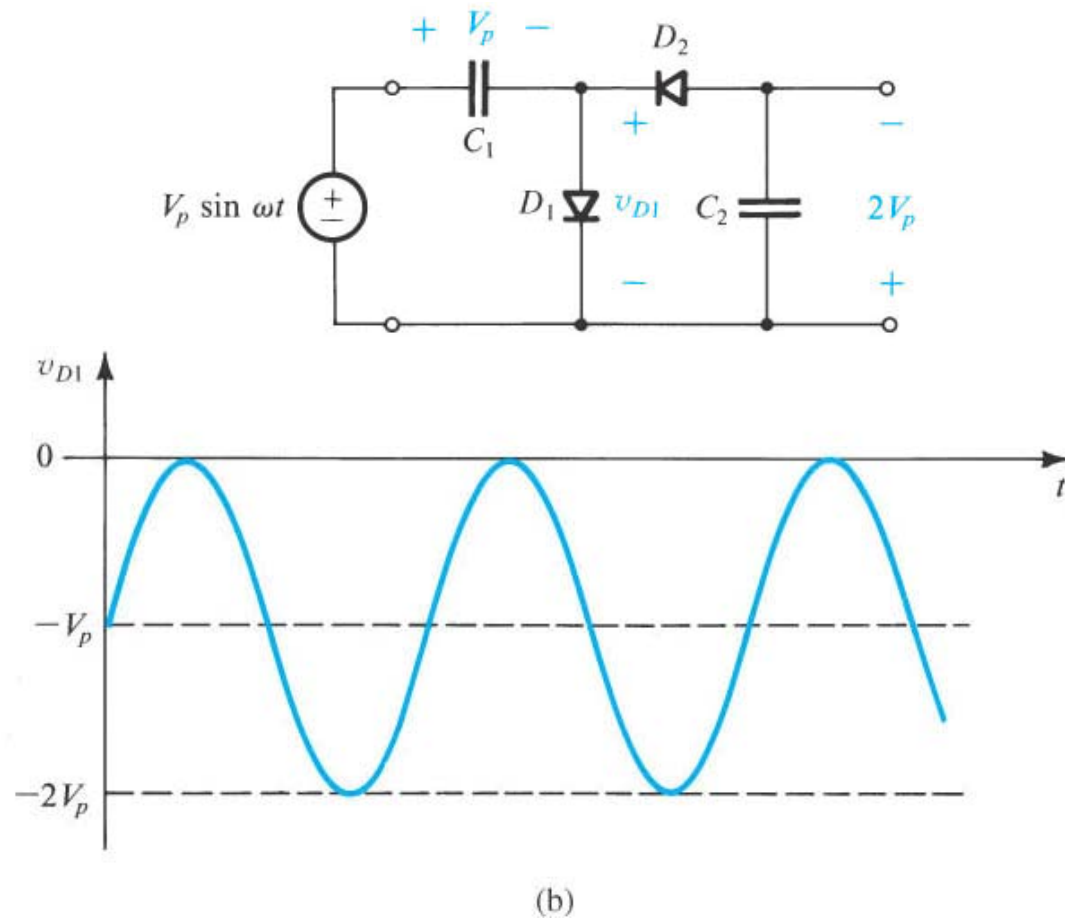
Différentes configurations de circuits écrêteurs

Verrouilleur



Exemple d'un circuit de verrouillage, a) tension d'entrée, b) circuit et c) tension de sortie

Multiplicateur de tension



Multiplicateur de tension, a) circuit et b) tension de sortie

Autres types de diodes

Diode électroluminescente « Light Emitting Diode (LED) »

Diode Schottky

Diode capacitive

Diode à effet tunnel

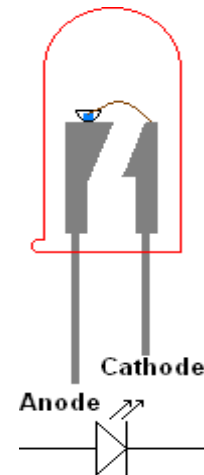
Photodiodes

piles solaires (piles photovoltaïque)

Diode électroluminescente (LED)

Fonctionnement

- ◆ Sous l'effet de la différence de tension appliquée à la jonction PN, les électrons et les trous se recombinent et donnent naissance à des photons, d'où l'émission de lumière
- ◆ Cette recombinaison exige un changement du niveau d'énergie des électrons libres, la longueur d'onde est liée au GAP d'énergie du semi-conducteur
- ◆ La couleur émise par la LED est liée à la longueur d'onde



Diode électroluminescente (LED)

Les LED sont apparues vers les années 1960

Types de LED

- ♦ LED unicolore
 - ❖ Rouge, vert, blanche et bleu (les 2 dernières sont récentes)
- ♦ LED bicolore et tricolore
- ♦ LED organiques

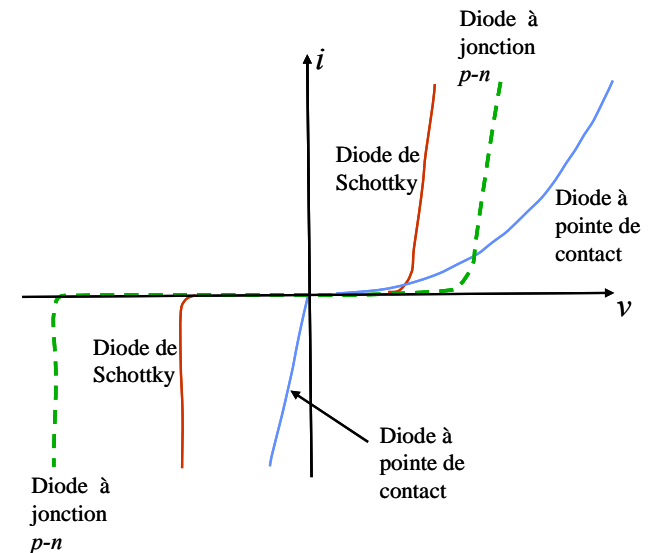
Applications

- ♦ Voyants lumineux pour appareils électroniques
- ♦ Éclairage (durée de vie, consommation et maintenance)
 - ❖ Feux de signalisation (rouge et orange)
 - ❖ Automobile interne et externe
 - ❖ Enseignes lumineuses

Diode Schottky

La jonction d'une diode de Schottky est constituée d'un métal et d'un semi-conducteur

- ♦ L'électron est le porteur majoritaire dans les deux matériaux (le nombre de trous dans le métal est négligeable)
- ♦ C'est cette particularité qui est responsable des caractéristiques exceptionnelles de la diode de Schottky



Diode Schottky

Avantages

- ♦ La faible capacité de jonction permet d'utiliser ce type de diode dans les applications à très hautes fréquences (RF)
 - ❖ La diode de Schottky peut opérer jusqu'à des fréquences de l'ordre de *20GHz*
- ♦ Le potentiel de jonction, pour un courant donné, est plus faible que les diodes conventionnelles et le temps de rétablissement est très court (*10ns*), même pour des forts courants
- ♦ Faible facteur de bruit
- ♦ Faible dissipation d'énergie

Conclusion

Ce qu'il faut retenir :

- ♦ Il est important de retenir les techniques d'analyse des circuits contenant des diodes et non les résultats obtenus

Conclusion

Aujourd'hui :

- ◆ On a appris comment utiliser les diodes pour réaliser certaines applications

La semaine prochaine :

- ◆ Afin de mieux comprendre les caractéristiques $i-v$, les équations et les limitations des diodes et aussi des transistors, on s'intéressera à la structure physique de la diode réalisée avec une jonction PN sur silicium

Exercice 1

Soit une diode Zener ayant une tension de $10V$ pour un courant de $10mA$ et une résistance incrémentale de 50Ω . Donner la tension de la diode pour les cas suivants :

- a) On divise par deux le courant
- b) On multiplie par deux le courant
- c) Quelle est la valeur de V_{Z0}

Solution exercice 1

Soit une diode Zener ayant une tension de $10V$ pour un courant de $10mA$ et une résistance incrémentale de 50Ω . Donner la tension de la diode pour les cas suivants :

a) On divise par deux le courant

Chute de tension de $0.250 V$

b) On multiplie par deux le courant

Gain de tension de $0.5 V$

c) Quelle est la valeur de V_{Z0}

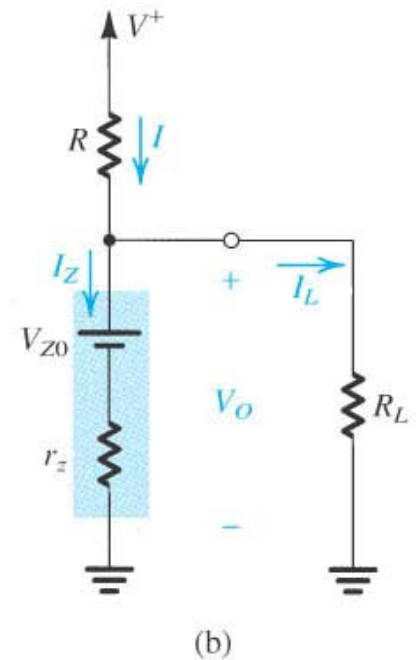
$9.5V$

Exercice 2

Soit le régulateur de tension vu en cours avec les caractéristiques suivante pour la diode Zener:

$6.8V-5mA$ avec $I_{ZK}=0.2 mA$ et $r_Z=20\Omega$.

- a) Si on suppose que la puissance maximum de la diode est de $30 mW$, calculer la résistance de charge R_L maximum qu'on peut utiliser sans endommager la diode. On suppose que $R=0.5k\Omega$ et $V^+=10V$.
- b) Pour la même puissance maximum, et si on suppose que $R=0.5k\Omega$ et $R_L=10k\Omega$, calculer la tension V^+ maximum qu'on peut appliquer sans endommager la diode. On suppose que



Solution exercice 2

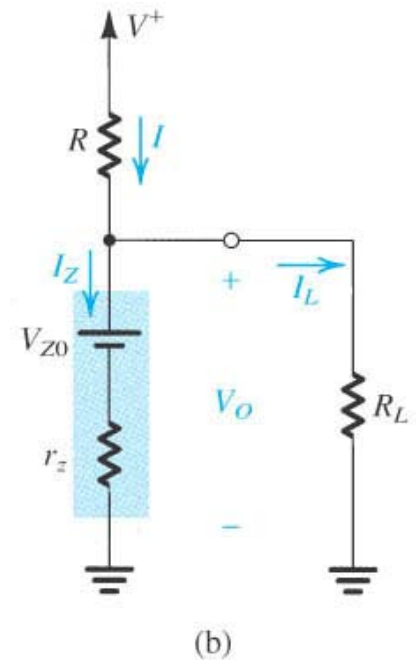
Soit le régulateur de tension vu en cours avec les caractéristiques suivante pour la diode Zener: $6.8V$ - $5mA$ avec $I_{ZK}=0.2mA$ et $r_z=20\Omega$.

- a) Si on suppose que la puissance maximum de la diode est de $30mW$, calculer la résistance de charge R_L maximum qu'on peut utiliser sans endommager la diode. On suppose que $R=0.5k\Omega$ et $V^+=10V$.

3.4 k Ω

- b) Pour la même puissance maximum, et si on suppose que $R=0.5k\Omega$ et $R_L=10k\Omega$, calculer la tension V^+ maximum qu'on peut appliquer sans endommager la diode. On suppose que

14.4 V



Exercice 3

Soit le redresseur simple vu en classe avec une tension d'entrée v_s triangulaire ayant $V_{CC}=20V$ et une fréquence de $1kHz$. On suppose que la résistance de charge $R=100\Omega$, et que la diode possède un $V_{DO}=0,7V$ et une résistance r_D négligeable devant R .

- 1) Quelle est la valeur moyenne de la tension de sortie v_o ?
- 2) Quel est l'intervalle de temps pendant lequel la diode conduit ?
- 3) Quel est le courant moyen dans la diode pendant la conduction ?
- 4) Quel est le courant maximum passant dans la diode ?

Solution exercice 3

Soit le redresseur simple vu en classe avec une tension d'entrée v_s triangulaire ayant $V_{CC}=20V$ et une fréquence de $1kHz$. On suppose que la résistance de charge $R=100\Omega$, et que la diode possède un $V_{DO}=0,7V$ et une résistance r_D négligeable devant R .

- 1) Quelle est la valeur moyenne de la tension de sortie v_o ?
2.15 V
- 2) Quel est l'intervalle de temps pendant lequel la diode conduit ?
0.465 ms par période de 1 ms
- 3) Quel est le courant moyen dans la diode pendant la conduction ?
43 mA
- 4) Quel est le courant maximum passant dans la diode ?
93 mA

Exercice 4

Soit un redresseur double alternance en pont est alimenté par l'intermédiaire d'un transformateur branché sur le secteur à $120V, 60Hz$. Le rapport de transformation du transformateur est $N_s/N_p=1/1$. On suppose que la charge résistive est égale à $1k\Omega$ et que le comportement des composants est idéal

- 1) Calculer le courant moyen dans la charge
- 2) Calculer le courant moyen dans chaque diode
- 3) Calculer la tension inverse de crête supportée par chaque diode
- 4) Calculer la puissance continue dissipée dans la charge

Solution exercice 4

Soit un redresseur double alternance en pont est alimenté par l'intermédiaire d'un transformateur branché sur le secteur à $120V, 60Hz$. Le rapport de transformation du transformateur est $N_s/N_p=1/1$. On suppose que la charge résistive est égale à $1k\Omega$ et que le comportement des composants est idéal

1) Calculer le courant moyen dans la charge

108 mA

2) Calculer le courant moyen dans chaque diode

54 mA

3) Calculer la tension inverse de crête supportée par chaque diode

169.7 V

4) Calculer la puissance continue dissipée dans la charge

11.7 W

Exercice 5

Répondre aux questions de l'exemple du redresseur simple alternance avec filtre (vu en cours) en supposant maintenant que la diode a une chute de tension de $0.7V$.

Solution exercice 5

Répondre aux questions de l'exemple du redresseur simple alternance avec filtre (vu en cours) en supposant maintenant que la diode a une chute de tension de $0.7V$.

Il faut remplacer V_p par $(V_p - V_{D0})$

Exercice 6

Soit le redresseur en pont au quel on ajoute une capacité C en parallèle avec la résistance de charge R . On considère un signal v_s avec $f=60Hz$ et $V_{srms}=12V$. On suppose que les diodes ont un $V_{DO}=0,8V$ et une résistance r_D négligeable

- 1) Quelle doit être la valeur de C pour que la tension d'ondulation n'excède pas 1V crête-à-crête lorsqu'on a une charge de 100Ω ?
- 2) Quelle est la tension moyenne de sortie ?
- 3) Quel est le courant moyen traversant la charge ?
- 4) Quel est l'angle de conduction des diodes?

Solution exercice 6

Soit le redresseur en pont au quel on ajoute une capacité C en parallèle avec la résistance de charge R . On considère un signal v_s avec $f=60\text{Hz}$ et $V_{srms}=12\text{V}$. On suppose que les diodes ont un $V_{DO}=0,8\text{V}$ et une résistance r_D négligeable

- 1) Quelle doit être la valeur de C pour que la tension d'ondulation n'excède pas 1V crête-à-crête lorsqu'on a une charge de 100Ω ?

1281 μF

- 2) Quelle est la tension moyenne de sortie ?

14.9 V

- 3) Quel est le courant moyen traversant la charge ?

149 mA

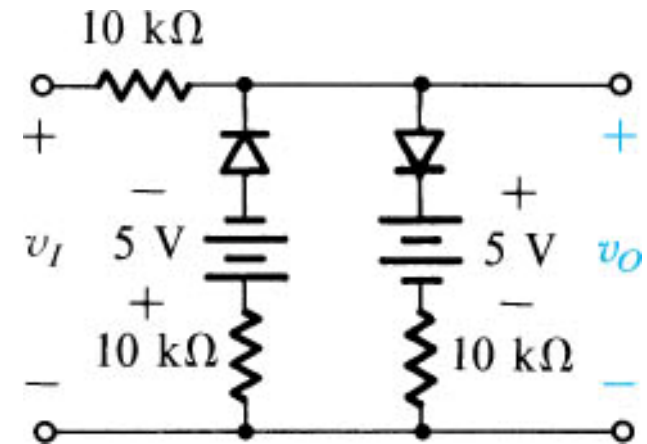
- 4) Quel est l'angle de conduction des diodes?

0.36 rad

Exercice 7

Soit le circuit ci-contre

- 1) De quel type de circuit s'agit-il ?
- 2) En supposant que les diodes sont idéales, donner la fonction de transfert du circuit.
- 3) Même question, mais en supposant que les diodes ont une chute de tension $V_{D0}=0.7V$.
- 4) Même question, mais en supposant que les diodes ont une chute de $V_{D0}=0.7V$ et une résistance dynamique $r_D=100\Omega$.



Solution exercice 7

Soit le circuit ci-contre

- 1) De quel type de circuit s'agit-il ?
- 2) En supposant que les diodes sont idéales, donner la fonction de transfert du circuit.

$$\begin{aligned}
 v_o &= v_I \text{ pour } -5 < v_I < +5 \\
 &= 0.5v_I - 2.5 \text{ pour } v_I < -5 \\
 &= 0.5v_I + 2.5 \text{ pour } v_I > +5
 \end{aligned}$$

- 3) Même question, mais en supposant que les diodes ont une chute de tension $V_{D0} = 0.7V$.

$$\begin{aligned}
 v_o &= v_I \text{ pour } -5 < v_I < +5 \\
 &= 0.5v_I - 2.85 \text{ pour } v_I < -5 \\
 &= 0.5v_I + 2.85 \text{ pour } v_I > +5
 \end{aligned}$$

- 4) Même question, mais en supposant que $V_{D0} = 0.7V$ et $r_D = 100\Omega$.

$$\begin{aligned}
 v_o &= v_I \text{ pour } -5 < v_I < +5 \\
 &= 0.4975v_I - 2.85 \text{ pour } v_I < -5 \\
 &= 0.4975v_I + 2.85 \text{ pour } v_I > +5
 \end{aligned}$$

