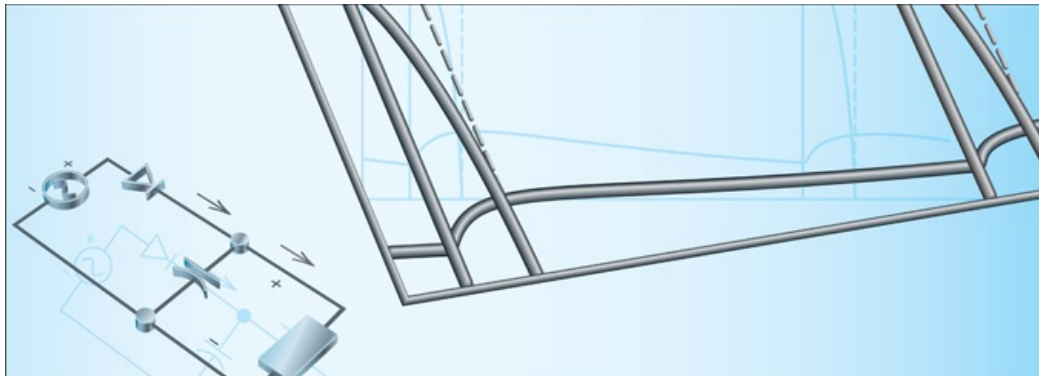


Chapitre 9 Diodes



L'étude de ce chapitre vous permettra de :

- Comprendre le fonctionnement des diodes et sélectionner les diodes pour diverses applications.
- Utiliser la technique de la ligne de charge graphique pour analyser les circuits non linéaires.
- Analyser et concevoir des circuits régulateurs de tension simples.
- Utiliser le modèle de diode idéale et les modèles linéaires par morceaux pour résoudre des circuits.
- Comprendre différents circuits de redressement et de mise en forme d'ondes.
- Comprendre les circuits équivalents à faible signal.

Introduction à ce chapitre :

Les circuits électroniques sont utiles pour traiter des informations et contrôler l'énergie. Les circuits électroniques sont notamment utilisés dans les ordinateurs, la radio, la télévision, les systèmes de navigation, les variateurs de lumière, les calculatrices, les appareils électroménagers, les commandes de machines, les capteurs de mouvement et les équipements d'arpentage. Une compréhension de base des circuits électroniques vous aidera à travailler avec l'instrumentation dans n'importe quel domaine de l'ingénierie. Dans les prochains chapitres, nous présentons les principaux appareils électroniques, leurs applications de base et plusieurs techniques d'analyse importantes. Dans ce chapitre, nous discutons de la diode.

9.1 Concepts de base des diodes

La diode est un dispositif basique mais très important qui possède deux bornes, la **anode** et le **cathode**. Le symbole de circuit pour une diode est représenté dans **Figure 9.1(a)**, et une caractéristique volt-ampère typique est montrée dans **Figure 9.1(b)**. Comme indiqué dans **Figure 9.1(a)**, la tension v_D à travers la diode est référencé positif à l'anode et négatif à la cathode. De même, le courant de la diode i_D est référencé positif de l'anode à la cathode.

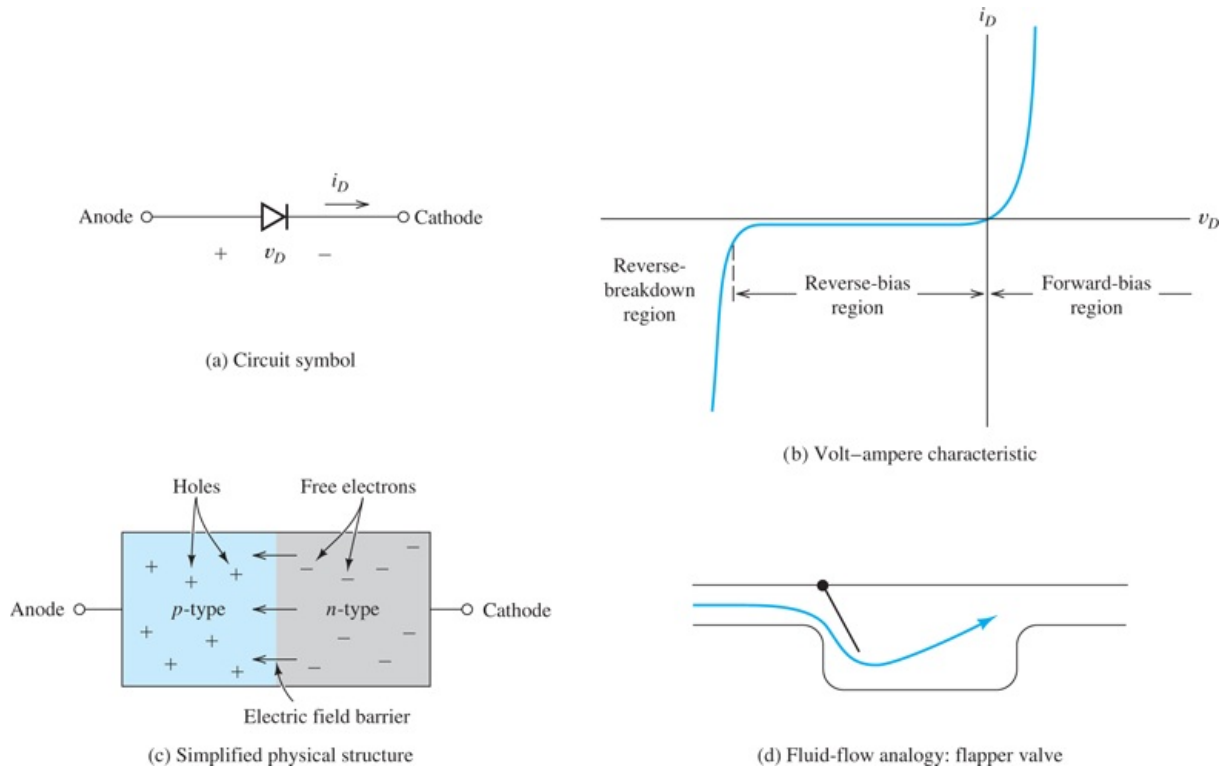


Figure 9.1

Diode semi-conductrice.

Notez dans la caractéristique que si la tension v_D appliquée à la diode est positive, des quantités de courant relativement importantes circulent pour de faibles tensions. Cette condition est appelée **biais direct**. Ainsi, le courant circule facilement à travers la diode dans le sens de la pointe de la flèche du symbole du circuit.

Les diodes conduisent facilement le courant de l'anode à la cathode (dans le sens de la flèche), mais ne permettent pas facilement au courant de circuler dans la direction opposée.

En revanche, pour des valeurs négatives modérées de v_D , le courant i_D est de très petite ampleur. C'est ce qu'on appelle la **région de polarisation inverse**, comme indiqué sur la caractéristique de la diode. Dans de nombreuses applications, la capacité de la diode à conduire facilement le courant dans un sens, mais pas dans le sens inverse, est très utile. Par exemple, dans une automobile, les diodes permettent au courant de l'alternateur de charger la batterie lorsque le moteur tourne. Cependant, lorsque le moteur s'arrête, les diodes empêchent la batterie de se décharger via l'alternateur. Dans ces applications, la diode est analogue à une soupape unidirectionnelle dans un système d'écoulement de fluide, comme illustré dans **Figure 9.1(d)**.



Si une tension de polarisation inverse suffisamment élevée est appliquée à la diode, le fonctionnement entre dans la région de claquage inverse de la caractéristique et des courants de grande amplitude circulent.

Si une tension de polarisation inverse suffisamment élevée est appliquée à la diode, le fonctionnement entre dans la **région de panne inversée** de la caractéristique, et des courants de grande amplitude circulent. À condition que la puissance dissipée dans la diode n'élève pas trop sa température, le fonctionnement en claquage inverse n'est pas destructeur pour le dispositif. En fait, nous verrons que les diodes sont parfois délibérément exploitées dans la région du claquage inverse.

Bref aperçu de la physique des diodes

Nous nous concentrerons sur le comportement externe des diodes et sur certaines de leurs applications en circuit. Cependant, à ce stade, nous donnons un aperçu de la physique interne de la diode.

Les diodes que nous considérons sont constituées d'une jonction entre deux types de matériaux semi-conducteurs (généralement du silicium avec des impuretés soigneusement sélectionnées). D'un côté de la jonction, les impuretés créent **n -type de matériau**, dans laquelle un grand nombre d'électrons se déplacent librement. De l'autre côté de la jonction, différentes impuretés sont utilisées pour créer (en fait) des particules chargées positivement appelées **trous**. Le matériau semi-conducteur dans lequel les trous prédominent est appelé **p -type de matériau**. La plupart des diodes sont constituées d'une jonction entre n -type de matériau et p -type de matériau, comme indiqué dans [Figure 9.1\(c\)](#).



Même sans tension externe appliquée, un champ électrique **barrière** apparaît naturellement à la p -jonction. Cette barrière retient les électrons libres sur la n -côté et les trous sur le p -côté de la jonction. Si une tension externe est appliquée avec une polarité positive sur le n -côté, la barrière est renforcée et les porteurs de charge ne peuvent pas traverser la jonction. Ainsi, pratiquement aucun courant ne circule. En revanche, si une tension est appliquée avec une polarité positive sur le p -côté, la barrière est réduite et des courants importants traversent la jonction. Ainsi, la diode conduit très peu de courant pour une polarité et un courant important pour l'autre polarité de la tension appliquée. L'anode correspond à la p -type de matériau et la cathode est la n -côté.

Diodes à faible signal

Différents matériaux et structures sont utilisés pour fabriquer des diodes. Pour l'instant, nous limiterons notre discussion aux diodes en silicium à faible signal, qui sont le type le plus courant dans les circuits électroniques de faible et moyenne puissance.

La courbe caractéristique d'une diode au silicium à faible signal typique fonctionnant à une température de 300 K est représentée dans [Figure 9.2](#). Notez que les échelles de tension et de courant pour la région de polarisation directe sont différentes de celles pour la zone de polarisation inverse. Ceci est nécessaire pour afficher les détails de la caractéristique, car les amplitudes de courant sont beaucoup plus faibles dans la zone de polarisation inverse que dans la zone de polarisation directe. De plus, les amplitudes de tension de polarisation directe sont bien inférieures aux tensions de claquage typiques.

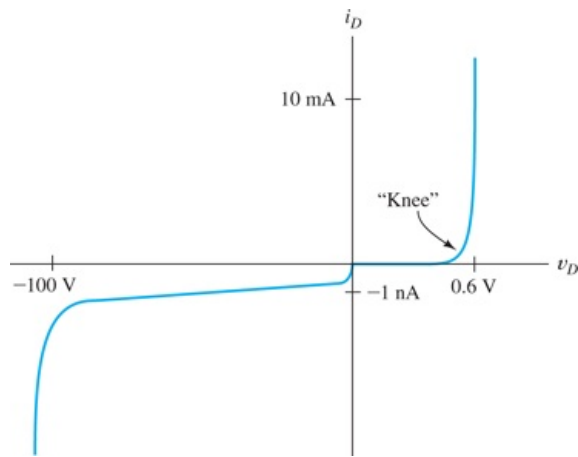


Figure 9.2

Caractéristique volt-ampère pour une diode au silicium à faible signal typique à une température de 300 K. Notez le changement d'échelle pour le courant et la tension négatifs.

Dans la région de polarisation directe, les diodes au silicium à faible signal conduisent très peu de courant (beaucoup moins de 1 mA) jusqu'à ce qu'une tension directe d'environ 0,6 V soit appliquée (en supposant que la diode soit à une température d'environ 300 K). Ensuite, le courant augmente très rapidement à mesure que la tension augmente. Nous disons que la caractéristique de polarisation directe présente une *genou* dans la caractéristique de polarisation directe à environ 0,6 V. (La valeur exacte de la tension de coude dépend de l'appareil, de sa température et de l'amplitude du courant. Les valeurs typiques sont de 0,6 ou 0,7 V.) Lorsque la température augmente, la tension de coude diminue d'environ 2 mV/K. (En raison du changement linéaire de la tension avec la température, les diodes sont utiles comme capteurs de température. La diode fonctionne à un courant fixe et la tension aux bornes de la diode dépend de sa température. Les thermomètres électroniques utilisés par les médecins contiennent un capteur à diode, des amplificateurs et d'autres circuits électroniques qui pilotent l'affichage de la température à cristaux liquides.)

Dans la région de polarisation inverse, le courant typique est d'environ 1 nA pour les diodes au silicium à faible signal à température ambiante. À mesure que la température augmente, le courant inverse augmente en amplitude. En règle générale, le courant inverse double pour chaque augmentation de 10 K de la température.

Lorsque le claquage inverse est atteint, le courant augmente très rapidement en amplitude. La tension pour laquelle cela se produit est appelée tension inverse **tension de claquage**. Par exemple, la tension de claquage de la caractéristique de diode indiquée dans [Figure 9.2](#) est approximativement -100 V. Plage de valeurs de la tension de claquage de quelques volts à plusieurs centaines de volts. Certaines applications nécessitent des diodes qui fonctionnent dans les zones de polarisation directe et de polarisation inverse non conductrice sans entrer dans la zone de claquage. Les diodes destinées à ces applications ont une spécification pour l'amplitude minimale de la tension de claquage.

Équation de Shockley

Sous certaines hypothèses simplificatrices, les considérations théoriques aboutissent à la relation suivante entre le courant et la tension pour une diode de jonction :

$$j_D = j_{em} \left[\exp \frac{V_D}{nV_T} - 1 \right] \quad (9.1)$$

C'est ce qu'on appelle l'**Équation de Shockley**. Le **courant de saturation** j_{em} , a une valeur de l'ordre de 10^{-14} A pour les diodes de jonction à faible signal à 300 K. (j_{em} dépend de la température, doublant pour chaque augmentation de température de 5 K pour les dispositifs au silicium.) Le paramètre n , connu sous le nom de **coefficient d'émission**, prend des valeurs entre 1 et 2, selon les détails de la structure de l'appareil. La tension V_T est donnée par

$$V_T = kT \frac{1}{q} \quad (9.2)$$

et s'appelle la **tension thermique**. La température de la jonction en kelvin est représentée par T . En outre, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann, et $q = 1,60 \times 10^{-19}$ C est la grandeur de la charge électrique d'un électron. À une température de 300 K, nous avons $V_T \approx 0,026$ V.

Si nous résolvons l'équation de Shockley pour la tension de la diode, nous constatons que

$$V_D = nV_T \ln \left[\frac{j_D}{j_{em}} + 1 \right] \quad (9.3)$$

Pour les diodes de jonction à faible signal fonctionnant à des courants directs entre $0,01 \mu\text{A}$ et 10 mA, l'équation de Shockley avec n pris comme unité est généralement très précis. Étant donné que la dérivation de l'équation de Shockley ignore plusieurs phénomènes, l'équation n'est pas précise pour des courants plus petits ou plus grands. Par exemple, sous polarisation inverse, l'équation de Shockley prédit $j_D \approx -j_{em}$, mais nous constatons généralement que le courant inverse est beaucoup plus grand que j_{em} (bien que toujours faible). De plus, l'équation de Shockley ne tient pas compte de la décomposition inverse.

Avec une polarisation directe d'au moins quelques dixièmes de volt, l'exponentielle dans l'équation de Shockley est bien supérieure à l'unité ; avec une bonne précision, nous avons

$$j_D \approx j_{em} \exp \frac{V_D}{nV_T} \quad (9.4)$$

Cette forme approximative de l'équation est souvent plus facile à utiliser.

Parfois, nous sommes en mesure d'obtenir des résultats analytiques utiles pour les circuits électroniques en utilisant l'équation de Shockley, mais des modèles beaucoup plus simples pour les diodes sont généralement plus utiles.

Diodes Zener

Les diodes destinées à fonctionner dans la région de claquage sont appelées **Diodes Zener**. Les diodes Zener sont utiles dans les applications pour lesquelles une tension de claquage constante est souhaitable. Par conséquent, les fabricants essaient d'optimiser les diodes Zener pour une caractéristique presque verticale dans la région de claquage. Le symbole de diode modifié illustré dans [Figure 9.3](#) est utilisé pour les diodes Zener. Les diodes Zener sont disponibles avec une répartition de tensions qui sont spécifiées avec une tolérance de $\pm 5\%$.



Figure 9.3

Symbole de la diode Zener.

Exercice 9.1

À une température de 300 K, une certaine diode de jonction a $j_{eD} = 0,1$ mA pour $v_D = 0,6$ V. Supposons que n est l'unité et l'utilisation $V_T = 0,026$ V. Trouver la valeur du courant de saturation j_{em} . Ensuite, calculez le courant de la diode à $v_D = 0,65$ V et à 0,70 V.

Répondre

$j_{em} = 9,50 \times 10^{-15}$ UN, $j_{eD} = 0,684$ mA, $j_{eD} = 4,68$ mA.

Exercice 9.2

Considérons une diode sous polarisation directe de telle sorte que la forme approximative de l'équation de Shockley ([Équation 9.4](#)) s'applique. Supposons que $V_T = 0,026$ V et $n = 1$.

- De quelle augmentation doit v_D augmenter pour doubler le courant ?
- Pour augmenter le courant d'un facteur 10 ?

Répondre

- $\Delta v_D = 18$ mV;
- $\Delta v_D = 59,9$ mV.

9.2 Analyse de la ligne de charge des circuits à diodes

Dans [Article 9.1](#), nous avons appris que les caractéristiques volt-ampère des diodes ne sont pas linéaires. Nous verrons En bref, d'autres appareils électroniques sont également non linéaires. D'autre part, les résistances ont des caractéristiques de voltampère linéaires, comme le montre [Figure 9.4](#). En raison de cette non-linéarité, de nombreuses techniques que nous avons étudié pour les circuits linéaires en [Chapitres 1](#) à [travers 6](#) ne s'appliquent pas aux circuits impliquant diodes. En fait, une grande partie de l'étude de l'électronique concerne les techniques d'analyse des circuits contenant des éléments non linéaires.

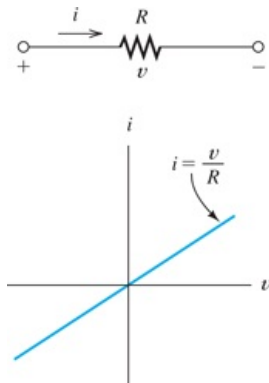


Figure 9.4

Contrairement aux diodes, les résistances ont des caractéristiques volt-ampère linéaires.

Les méthodes graphiques offrent une approche de l'analyse des circuits non linéaires. Prenons par exemple le circuit illustré dans [Figure 9.5](#). En appliquant la loi de tension de Kirchhoff, nous pouvons écrire l'équation

$$V_{SS} = Ri_D + v_D \quad (9.5)$$

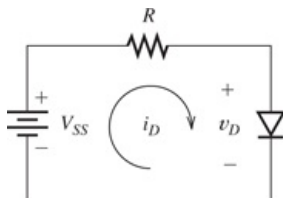


Figure 9.5

Circuit d'analyse de ligne de charge.

Nous supposons que les valeurs de V_{SS} et R sont connus et que nous souhaitons retrouver i_D et v_D . Ainsi, [Équation 9.5](#) a deux inconnues, et une autre équation (ou son équivalent) est nécessaire avant de pouvoir trouver une solution.

Ceci est disponible sous forme graphique dans [Figure 9.6](#), qui montre la caractéristique volt-ampère de la diode.

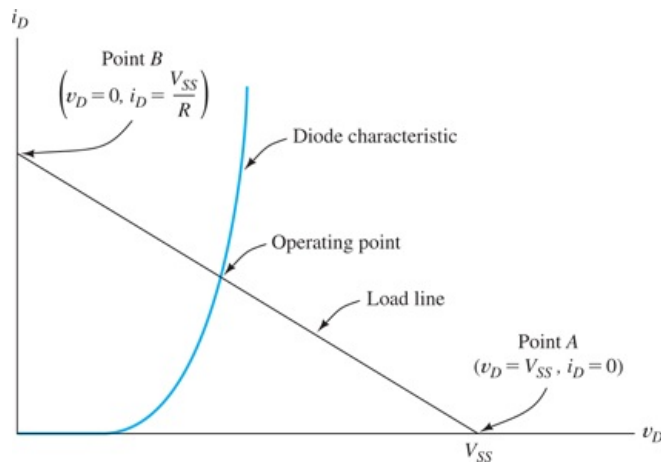









Figure 9.6

Analyse de la ligne de charge du circuit de [Figure 9.5](#) .

Nous pouvons obtenir une solution en traçant [Équation 9.5](#)  sur le même ensemble d'axes utilisé pour la diode caractéristique. Depuis [Équation 9.5](#) , il se trace comme une ligne droite, qui peut être tracée si deux points satisfaisant l'équation sont localisés. Une méthode simple consiste à supposer que $i_D = 0$, et puis [Équation 9.5](#) rendements $v_D = V_{SS}$. Cette paire de valeurs est représentée par un point A dans [Figure 9.6](#) . Un deuxième point résulte si nous supposons que $v_D = 0$, pour laquelle l'équation donne $i_D = V_{SS}/R$. La paire de valeurs est représentée par un point B dans [Figure 9.6](#) . Ensuite, les points de connexion A et B aboutissent à un compot appelé le **ligne de charge**. Le **point de fonctionnement** est l'intersection de la ligne de charge et de la caractéristique de la diode. Ce point représente la solution simultanée de [Équation 9.5](#)  et la caractéristique de la diode.

Exemple 9.1 Analyse de la ligne de charge

Si le circuit de [Figure 9.5](#)  a $V_{SS} = 2\text{ V}$, $R = 1\text{ k}\Omega$, et une diode avec la caractéristique montrée dans [Figure 9.7](#) , trouvez la tension et le courant de la diode au point de fonctionnement.

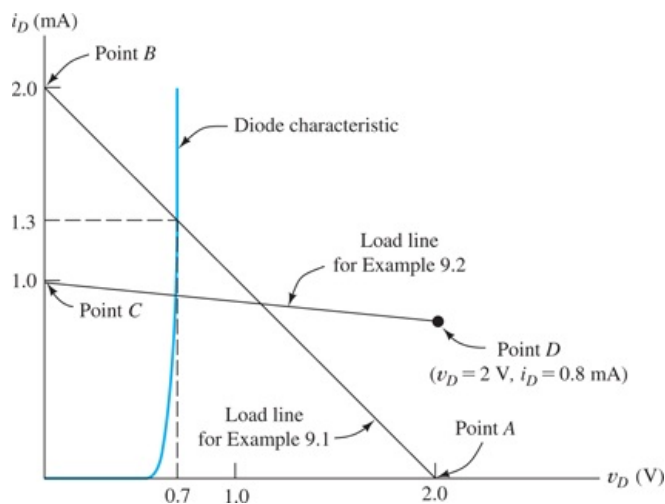




Figure 9.7

Analyse de la ligne de charge pour [Exemples 9.1](#)  et [9.2](#) .

Solution

Tout d'abord, nous localisons les extrémités de la ligne de charge. En remplaçant $v_D = 0$ et les valeurs données pour V_{SS} et R dans [Équation 9.5](#) , rendements $i_D = 2\text{ mA}$. Ces valeurs sont représentées sous forme de points B dans [Figure 9.7](#) . Remplacement de $i_D = 0$ et les valeurs du circuit donnent comme résultat $v_D = 2\text{ V}$. Ces valeurs sont représentées sous forme de points A sur la figure. La construction de la ligne de charge donne un point de fonctionnement de $v_D \approx 0,7\text{ V}$ et $i_D \approx 1,3\text{ mA}$, comme indiqué sur la figure.

Exemple 9.2 Analyse de la ligne de charge

Répéter **Exemple 9.1** si $V_{SS} = 10\text{ V}$ et $R = 10\text{ k}\Omega$.

Solution

Si nous laissons $v_D = 0$ et substituer les valeurs dans **Équation 9.5**, nous constatons que $i_{ED} = 1\text{ mA}$. Ceci est représenté comme suit indiquant C dans **Figure 9.7**.

Lorsqu'une interception de la ligne de charge tombe de la page, nous sélectionnons un point sur le bord de la page.

Si nous procédons comme précédemment en supposant que $i_{ED} = 0$, nous constatons que $v_D = 10\text{ V}$. Il s'agit d'un point parfaitement valide sur la ligne de charge, mais il est tracé à un point éloigné de la page. Bien entendu, nous pouvons utiliser n'importe quel autre point satisfaisant **Équation 9.5** pour localiser la ligne de charge. Puisque nous avons déjà le point C sur le j_{ED} axe, un bon point à utiliser serait sur le bord droit de **Figure 9.7**. Ainsi, nous supposons que $v_D = 2\text{ V}$ et substituer les valeurs dans **Équation 9.5**, résultant en $i_{ED} = 0,8\text{ mA}$. Ces valeurs sont représentées sous forme de points D . Ensuite, nous pouvons tracer la ligne de charge et constater que les valeurs du point de fonctionnement sont $V_{DQ} \approx 0,68\text{ V}$ et $i_{EDQ} \approx 0,93\text{ mA}$.

Exercice 9.3

Trouver le point de fonctionnement du circuit de **Figure 9.5** si la caractéristique de la diode est indiquée dans **Figure 9.8** et:

- a. $V_{SS} = 2\text{ V}$ et $R = 100\ \Omega$;
- b. $V_{SS} = 15\text{ V}$ et $R = 1\text{ k}\Omega$;
- c. $V_{SS} = 1,0\text{ V}$ et $R = 20\ \Omega$.

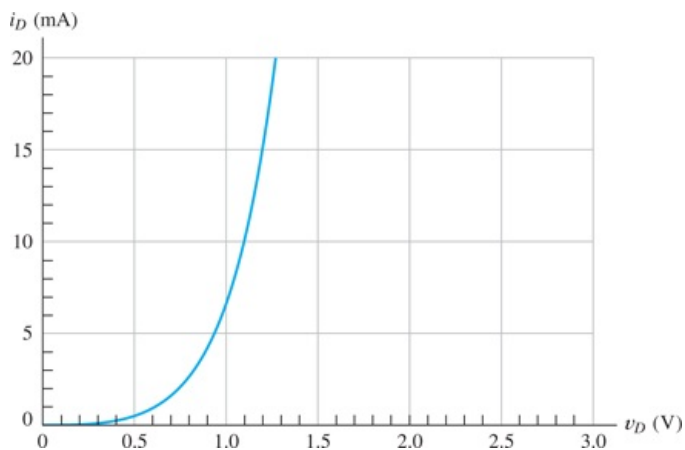


Figure 9.8

Caractéristique de la diode pour **Exercice 9.3**.

Répondre

- a. $V_{DQ} \approx 1,1\text{ V}$, $i_{EDQ} \approx 9,0\text{ mA}$;
- b. $V_{DQ} \approx 1,2\text{ V}$, $i_{EDQ} \approx 13,8\text{ mA}$;
- c. $V_{DQ} \approx 0,91\text{ V}$, $i_{EDQ} \approx 4,5\text{ mA}$.

9.3 Circuits régulateurs de tension à diode Zener

Parfois, un circuit qui produit une tension de sortie constante tout en fonctionnant à partir d'une tension d'alimentation variable est nécessaire. De tels circuits sont appelés **régulateurs de tension**. Par exemple, si nous voulions faire fonctionner des circuits informatiques à partir de la batterie d'une automobile, un régulateur de tension serait nécessaire. La tension de la batterie d'une automobile varie généralement entre 10 et 14 V (selon l'état de la batterie et si le moteur tourne ou non). De nombreux circuits informatiques nécessitent une tension presque constante de 5 V. Il faut donc un régulateur qui fonctionne à partir de l'alimentation de 10 à 14 V et produit une sortie de 5 V presque constante.

Un circuit régulateur de tension fournit une tension presque constante à une charge à partir d'une source variable.

Dans cette section, nous utilisons la technique de la ligne de charge que nous avons introduite dans [Section 9.2](#) pour analyser un simple circuit régulateur. Le circuit régulateur est représenté dans [Figure 9.9](#). (Pour un bon fonctionnement, il est nécessaire que la valeur minimale de la tension de la source variable doit être légèrement supérieure à la tension de sortie souhaitée.) La diode Zener a une tension de claquage égale à la tension de sortie souhaitée. La résistance R limite le courant de la diode à une valeur sûre afin que la diode Zener ne surchauffe pas.

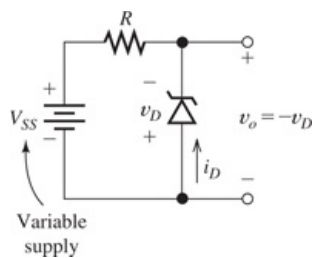


Figure 9.9

Un circuit régulateur simple qui fournit une tension de sortie presque constante v_o à partir d'une tension d'alimentation variable.

En supposant que la caractéristique de la diode soit disponible, nous pouvons construire une ligne de charge pour analyser le fonctionnement du circuit. Comme précédemment, nous utilisons la loi de tension de Kirchhoff pour écrire une équation reliant v et i . (Dans ce circuit, la diode fonctionne dans la zone de claquage avec des valeurs négatives pour v et i .) Pour le circuit de [Figure 9.9](#), nous obtenons

$$V_{SS} + Ri_D + v_D = 0 \quad (9.6)$$

Il s'agit encore une fois de l'équation d'une ligne droite, la position de deux points quelconques suffit donc à construire la ligne de charge. L'intersection de la ligne de charge avec la caractéristique de la diode donne le point de fonctionnement.

Exemple 9.3 Analyse de la ligne de charge d'un régulateur de tension à diode Zener

Le circuit régulateur de tension de [Figure 9.9](#) a $R = 1\text{ k}\Omega$ et utilise une diode Zener ayant la caractéristique montrée dans [Figure 9.10](#). Trouvez la tension de sortie pour $V_{SS} = 15\text{ V}$. Répéter pour $V_{SS} = 20\text{ V}$.

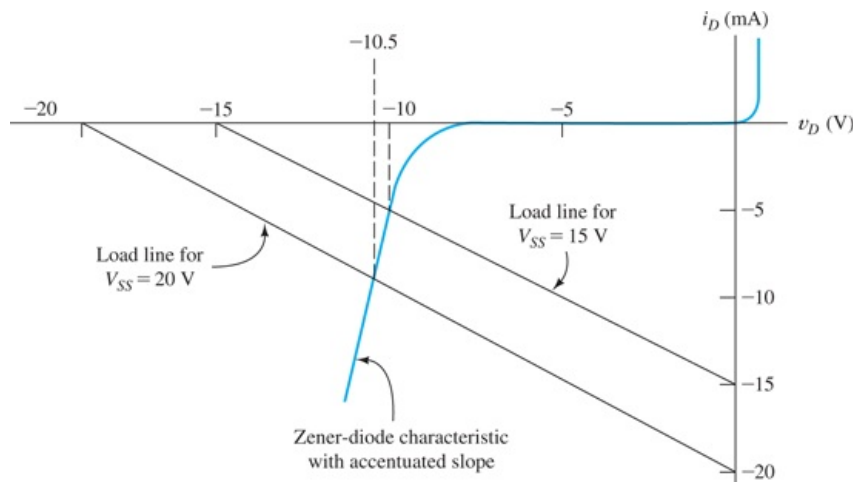


Figure 9.10

Voir [Exemple 9.3](#).

Solution

Les lignes de charge pour les deux valeurs de V_{SS} sont affichées dans [Figure 9.10](#). Les tensions de sortie sont déterminées à partir des points où les lignes de charge coupent la caractéristique de la diode. Les tensions de sortie sont $v_{OL} = 10,0\text{ V}$ pour $V_{SS} = 15\text{ V}$ et $v_{OL} = 10,5\text{ V}$ pour $V_{SS} = 20\text{ V}$. Ainsi, une variation de 5 V de la tension d'alimentation entraîne seulement une variation de $0,5\text{ V}$ de la tension de sortie régulée.

Les diodes Zener actuelles sont capables de bien meilleures performances que celles-ci. La pente de la caractéristique a été accentuée dans [Figure 9.10](#) pour plus de clarté, les diodes Zener réelles ont une orientation plus proche de la verticale en panne.

Pente de la ligne de charge

Notez que les deux lignes de charge représentées dans [Figure 9.10](#) sont parallèles. Inspection de [Équation 9.5](#) ou [Équation 9.6](#) montre que la pente de la ligne de charge est $-1/R$. Ainsi, un changement de la tension d'alimentation modifie la position, mais pas la pente de la ligne de charge.

Les lignes de charge pour différentes tensions de source (mais la même résistance) sont parallèles.

Analyse des lignes de charge des circuits complexes

Tout circuit contenant des résistances, des sources de tension, des sources de courant et un seul élément non linéaire à deux bornes peut être analysé par la technique de la ligne de charge. Tout d'abord, l'équivalent de Thévenin est trouvé pour la partie linéaire du circuit comme illustré dans [Figure 9.11](#). Ensuite, une ligne de charge est construite pour trouver la tension de fonctionnement point sur la caractéristique du dispositif non linéaire. Une fois le point de fonctionnement de l'élément non linéaire connu, les tensions et les courants peuvent être déterminés dans le circuit d'origine.

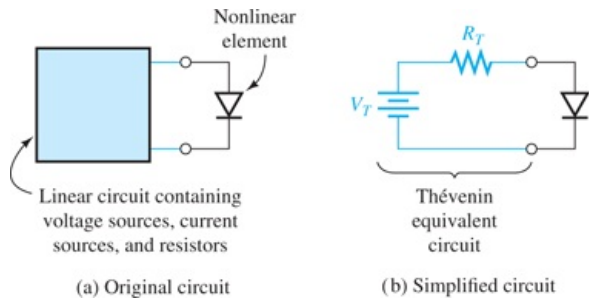


Figure 9.11

L'analyse d'un circuit contenant un seul élément non linéaire peut être réalisée par une analyse de ligne de charge d'un circuit simplifié.

Exemple 9.4 Analyse d'un régulateur à diode Zener avec une charge

Considérez le circuit régulateur à diode Zener illustré dans [Figure 9.12\(a\)](#). La caractéristique de la diode est montré dans [Figure 9.13](#). Trouver la tension de charge v_L et courant source i_{es} si $V_{SS} = 24 \text{ V}$, $R = 1,2 \text{ k}\Omega$, et $R_L = 6 \text{ k}\Omega$.

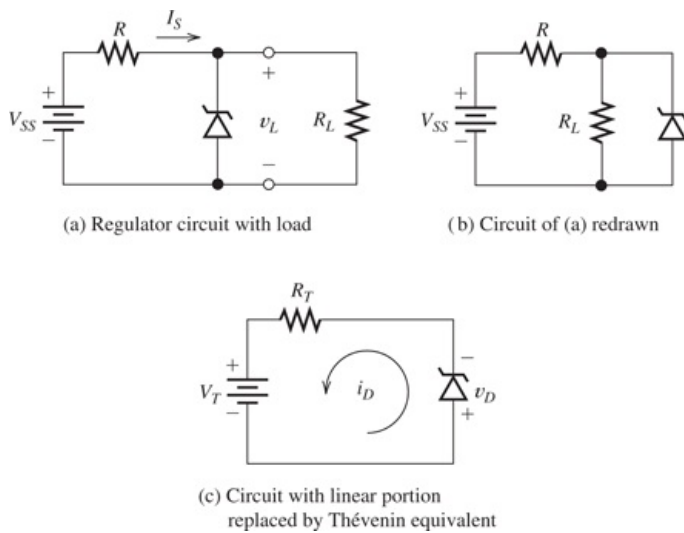


Figure 9.12

Voir [Exemple 9.4](#).

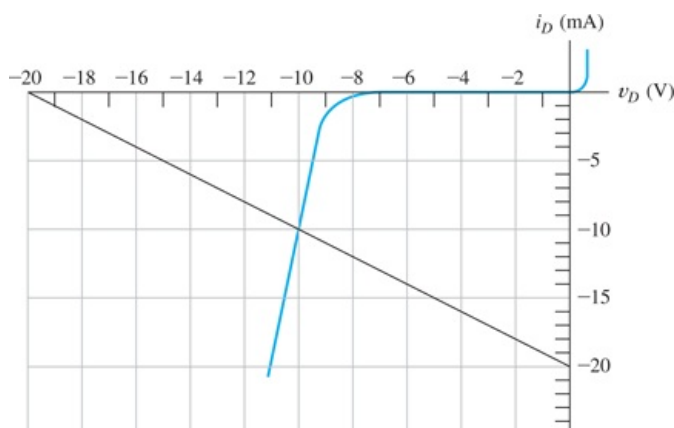



Figure 9.13

Caractéristique de la diode Zener pour [Exemple 9.4](#) et [Exercice 9.4](#).

Solution

Considérons d'abord le circuit tel que redessiné dans [Figure 9.12\(b\)](#) , dans lequel nous avons regroupé les linéaires éléments ensemble sur le côté gauche de la diode. Ensuite, nous trouvons l'équivalent Thévenin pour la partie linéaire du circuit. La tension Thévenin est la tension en circuit ouvert (c'est-à-dire la tension aux bornes de R_L avec la diode remplacée par un circuit ouvert), qui est donné par

$$V_T = V_{SS} \frac{R_L}{R + R_L} = 20 \text{ V}$$


La résistance de Thévenin peut être trouvée en mettant à zéro la source de tension et en regardant dans le circuit à partir des bornes de la diode. Ceci est accompli en réduisant V_{SS} à zéro pour que la source de tension devienne un court-circuit. Ensuite, nous avons R et R_L en parallèle, donc la résistance de Thévenin est


$$R_T = \frac{R R_L}{R + R_L} = 1 \text{ k}\Omega$$

Le circuit équivalent résultant est illustré dans [Figure 9.12\(c\)](#) .


Maintenant, nous pouvons utiliser la loi de tension de Kirchhoff pour écrire l'équation de la ligne de charge à partir du circuit équivalent comme

$$V_T + R_T j_{ED} + v_D = 0$$

En utilisant les valeurs trouvées pour V_T et R_T , nous pouvons construire la ligne de charge montrée dans [Figure 9.13](#)  et localiser le point de fonctionnement. Cela donne $v_L = -v_D = 10,0 \text{ V}$.

Une fois v_L est connu, nous pouvons trouver les tensions et les courants dans le circuit d'origine. Par exemple, en utilisant la valeur de tension de sortie de $10,0 \text{ V}$ dans le circuit d'origine de [Figure 9.12\(a\)](#) , nous constatons que $j_E = V_{SS} - v_L / R = 11,67 \text{ mA}$.

Exercice 9.4

Trouvez la tension aux bornes de la charge dans [Exemple 9.4](#)  si:

a. $R_L = 1,2 \text{ k}\Omega$;

b. $R_L = 400 \Omega$.

Répondre

a. $v_L \approx 9,4 \text{ V}$;

b. $v_L \approx 6,0 \text{ V}$. (Notez que ce régulateur n'est pas parfait car la tension de charge varie lorsque le courant de charge change.)

Exercice 9.5

Considérez le circuit de **Figure 9.14(a)**. Supposons que la caractéristique de claquage soit verticale, comme indiqué dans **Figure 9.14(b)**. Trouver la tension de sortie v_{oL} pour:

a. $i_{eL} = 0$;

b. $i_{eL} = 20 \text{ mA}$;

c. $i_{eL} = 100 \text{ mA}$. [Indice: En appliquant la loi de tension de Kirchhoff au circuit, nous avons

$$15 = 100i_{eL} - i_{eD} - v_D$$

Construisez une ligne de charge différente pour chaque valeur de i_{eL} .]

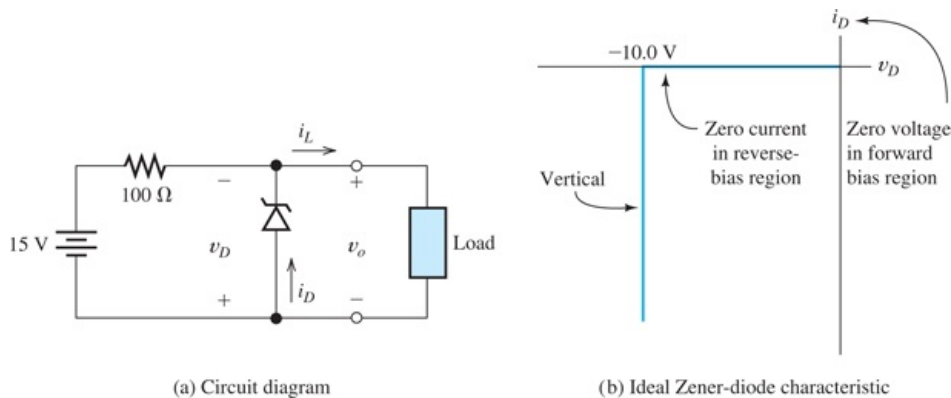


Figure 9.14

Voir **Exercice 9.5**.

Répondre


a. $v_{oL} = 10,0 \text{ V}$;

b. $v_{oL} = 10,0 \text{ V}$;

c. $v_{oL} = 5,0 \text{ V}$. (Notez que le régulateur n'est pas efficace pour les courants de charge importants.)


9.4 Modèle de diode idéale

L'analyse graphique de la ligne de charge est utile pour certains circuits, comme le régulateur de tension étudié dans [Section 9.3](#)

 Cependant, il est trop compliqué pour les circuits plus complexes. Au lieu de cela, nous utilisons souvent des modèles plus simples pour comportement approximatif de la diode.

Un modèle pour une diode est le **diode idéale**, qui est un conducteur parfait avec une chute de tension nulle dans le sens direct. Dans le sens inverse, la diode idéale est un circuit ouvert. Nous utilisons l'hypothèse de la diode idéale si notre jugement nous indique que la chute de tension directe de la diode et le courant inverse sont négligeables, ou si nous voulons une compréhension de base d'un circuit plutôt qu'une analyse exacte.

La diode idéale agit comme un court-circuit pour les courants directs et comme un circuit ouvert avec une tension inverse appliquée.

La caractéristique volt-ampère de la diode idéale est illustrée dans [Figure 9.15](#) . Si i_D est positif, v_D est nul, et nous disons que la diode est dans le *sur*état. D'autre part, si v_D est négatif, i_D est nul, et nous disons que la diode est dans le *désactivé* état.

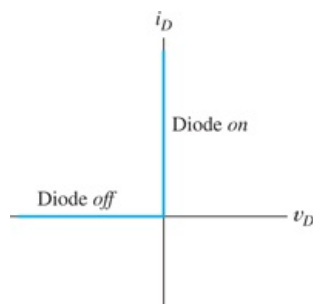


Figure 9.15

Caractéristique volt-ampère d'une diode idéale.

États supposés pour l'analyse des circuits à diodes idéales


Lors de l'analyse d'un circuit contenant des diodes idéales, nous ne savons pas à l'avance quelles diodes sont allumées et lesquelles sont éteintes. Nous sommes donc obligés de faire une supposition réfléchie. Ensuite, nous analysons le circuit pour trouver les courants dans les diodes supposées allumées et les tensions aux bornes des diodes supposées éteintes. Si i_D est positif pour les diodes supposées allumées et si v_D est négatif pour les diodes supposées éteintes, nos hypothèses sont correctes et nous avons résolu le circuit. (Nous supposons que i_D est référencé positif dans le sens direct et que v_D est référencé positif à l'anode.) Sinon, nous devons faire une autre hypothèse sur les diodes et réessayer. Après un peu de pratique, notre première hypothèse est généralement correcte, du moins pour les circuits simples.

Une procédure étape par étape pour analyser les circuits contenant des diodes idéales consiste à :

1. Supposons un état pour chaque diode, soit allumée (c'est-à-dire un court-circuit) soit éteinte (c'est-à-dire un circuit ouvert). Il y a des combinaisons possibles d'états de diode.
2. Analysez le circuit pour déterminer le courant traversant les diodes supposées allumées et la tension aux bornes des diodes supposées éteintes.
3. Vérifiez si le résultat est cohérent avec l'état supposé pour chaque diode. Le courant doit circuler dans le sens direct pour les diodes supposées allumées. De plus, la tension aux bornes des diodes supposées éteintes doit être positive à la cathode (c'est-à-dire en polarisation inverse).

4. Si les résultats sont cohérents avec les états supposés, l'analyse est terminée. Sinon, revenez à l'étape 1 et choisissez une autre combinaison d'états de diode.

Exemple 9.5 Analyse par états de diodes supposés

Utilisez le modèle de diode idéale pour analyser le circuit illustré dans **Figure 9.16(a)** est  Commencez par supposer que D_1 est éteint et D_2 est allumé.

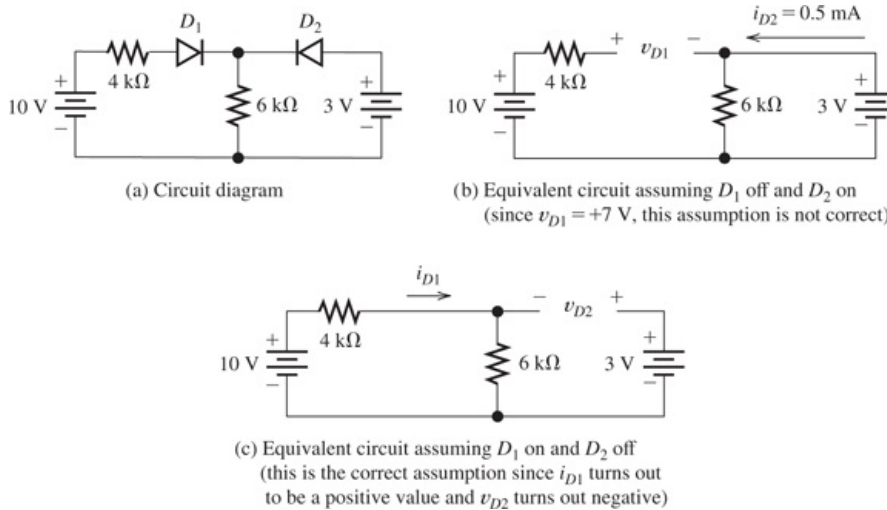






Figure 9.16

Analyse d'un circuit à diodes, en utilisant le modèle de la diode idéale. Voir **Exemple 9.5** .

Solution

Avec D_1 désactivé et D_2 sur, le circuit équivalent est montré dans **Figure 9.16(b)**  La résolution donne des résultats $i_{D2} = 0,5$ mA. Étant donné que le courant dans D_2 est positif, notre hypothèse selon laquelle D_2 est allumé semble être correct. Cependant, en continuant la résolution du circuit de **Figure 9.16(b)** , nous constatons que $v_{D1} = +7$ V. C'est pas cohérent avec l'hypothèse selon laquelle D_1 est désactivé. Nous devons donc essayer une autre hypothèse.

Cette fois, nous supposons que D_1 est allumé et D_2 est éteint. Le circuit équivalent pour ces hypothèses est illustré dans **Figure 9.16(c)** . Nous pouvons résoudre ce circuit pour constater que $i_{D1} = 1$ mA et $v_{D2} = -3$ V. Ces valeurs sont cohérentes avec les hypothèses sur les diodes (D_1 sur et D_2 off) et, par conséquent, sont correctes.

Avis dans **Exemple 9.5**  que même si le courant circule dans le sens direct de D_2 pour notre première supposition à propos des états de diodes (D_1 désactivé et D_2 sur), la bonne solution est que D_2 est éteint. Ainsi, en général, nous ne pouvons pas décider de l'état d'une diode particulière tant que nous n'avons pas trouvé une combinaison d'états qui fonctionne pour toutes les diodes du circuit.

En général, nous ne pouvons pas décider de l'état d'une diode particulière tant que nous n'avons pas trouvé une combinaison d'états qui fonctionne pour toutes les diodes du circuit.

Pour un circuit contenant n diodes, il y a 2^n états possibles. Ainsi, une recherche exhaustive permet finalement d'obtenir la solution pour chaque circuit.


Exercice 9.6

Montrer que la condition D_1 désactivé et D_2 off n'est pas valable pour le circuit de **Figure 9.16(a)** .

Exercice 9.7

Montrer que la condition D_1 sur et D_2 on n'est pas valable pour le circuit de [Figure 9.16\(a\)](#) .

Exercice 9.8

Trouvez les états des diodes pour les circuits indiqués dans [Figure 9.17](#)  Supposons des diodes idéales.

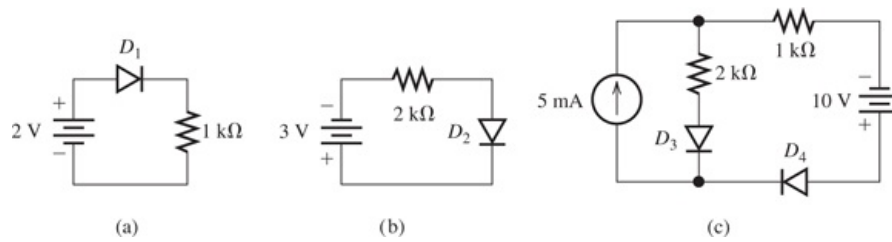


Figure 9.17

Circuits pour [Exercice 9.8](#) .

Répondre


a. D_1 est allumé;

b. D_2 est éteint;

c. D_3 est éteint; et D_4 est allumé.

9.5 Modèles de diodes linéaires par morceaux

Parfois, nous souhaitons un modèle plus précis que l'hypothèse de la diode idéale, mais nous ne voulons pas recourir à des équations non linéaires ou à des techniques graphiques. Nous pouvons alors utiliser **modèles linéaires par morceaux** pour les diodes. Nous approchons d'abord la caractéristique volt-ampère réelle par des segments de droite. Ensuite, nous modélisons chaque section de la caractéristique de la diode avec une résistance en série avec une source de tension constante. Différentes valeurs de résistance et de tension sont utilisées dans les différentes sections de la caractéristique.

Considérez la résistance R_a en série avec une source de tension V_a montré dans **Figure 9.18(a)** . Nous pouvons écrire l'équation suivante, reliant la tension et le courant de la combinaison série :

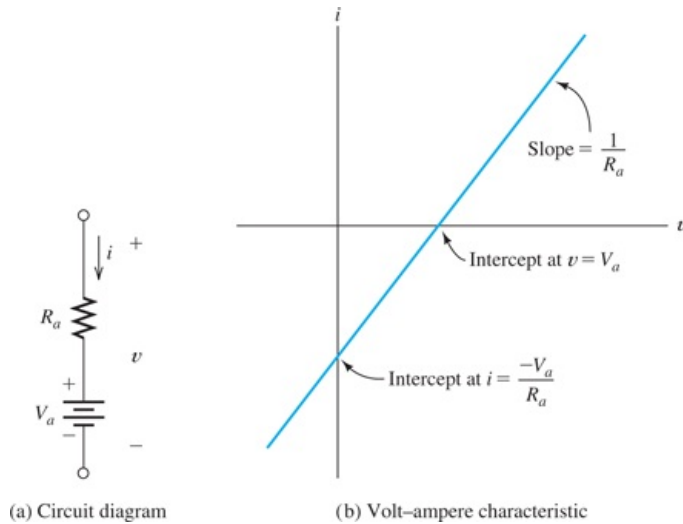


Figure 9.18

Circuit et caractéristique volt-ampère pour les modèles linéaires par morceaux.

$$v = R_a i + V_a \quad (9.7)$$

Le courant i est tracé par rapport à v dans **Figure 9.18(b)** . Notez que l'interception sur l'axe de tension est à $v = V_a$ et que la pente de la ligne est $1/R_a$.

Étant donné une caractéristique volt-ampère en ligne droite, nous pouvons travailler à rebours pour trouver la tension et la résistance série correspondantes. Ainsi, après avoir approximé une caractéristique volt-ampère non linéaire par plusieurs segments en ligne droite, un modèle de circuit composé d'une source de tension et d'une résistance série peut être trouvé pour chaque segment.

Exemple 9.6 Modèle linéaire par morceaux pour une diode Zener

Trouver des modèles de circuit pour la caractéristique volt-ampère de la diode Zener illustrée dans **Figure 9.19** segments de ligne droite représentés.

Utilisez le

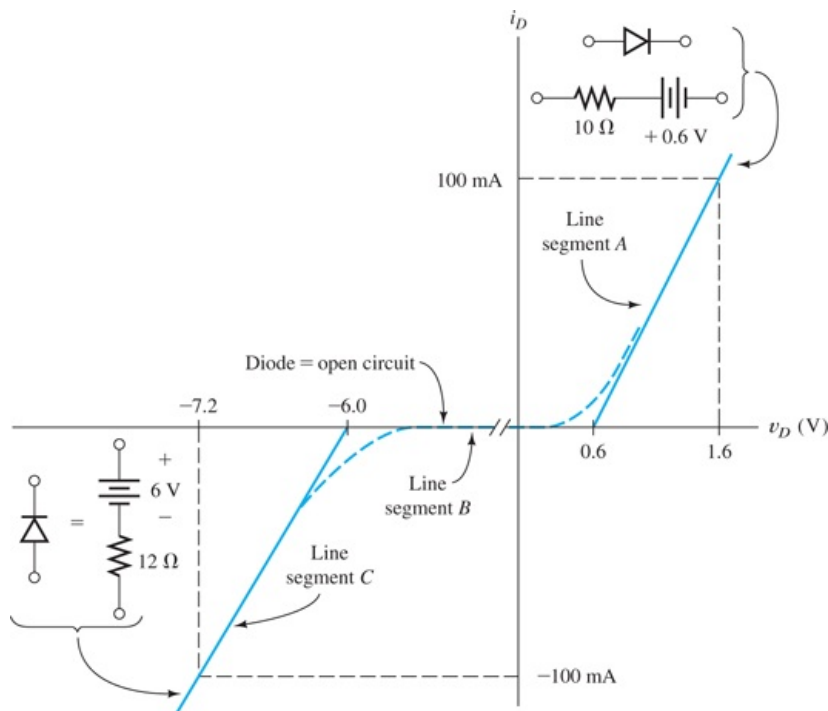


Figure 9.19

Modèles linéaires par morceaux pour la diode de **Exemple 9.6**

Solution

Pour le segment de ligne *A* de **Figure 9.19**, l'interception sur l'axe de tension est de 0,6 V et l'inverse de la pente est $10\ \Omega$. Par conséquent, le modèle de circuit pour la diode sur ce segment est un $10\text{-}\Omega$ résistance en série avec une source de 0,6 V, comme indiqué sur la figure. Segment de ligne *B* a un courant nul et, par conséquent, le circuit équivalent pour le segment *B* est un circuit ouvert, comme illustré sur la figure. Enfin, le segment de ligne *C* a une interception de -6 V et une pente réciproque de $12\ \Omega$, ce qui donne le circuit équivalent illustré. Ainsi, cette diode peut être approchée par l'un de ces circuits linéaires, selon l'endroit où se trouve le point de fonctionnement.

Exemple 9.7 Analyse à l'aide d'un modèle linéaire par morceaux

Utilisez les modèles de circuits trouvés dans [Exemple 9.6](#) pour résoudre le courant dans le circuit de [Chiffre 9.20\(a\)](#).

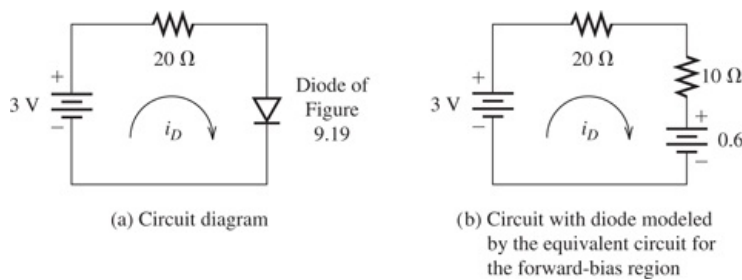


Figure 9.20

Circuit pour [Exemple 9.7](#).

Solution

Étant donné que la source 3 V a une polarité qui entraîne une polarisation directe de la diode, nous supposons que le point de fonctionnement est sur le segment de ligne UN de [Figure 9.19](#). Par conséquent, le circuit équivalent pour la diode est celle du segment UN . En utilisant ce circuit équivalent, nous avons le circuit de [Figure 9.20\(b\)](#). En résolvant, nous trouvons que $i_D = 80 \text{ mA}$.

Exercice 9.9

Utilisez le modèle de circuit approprié à partir de [Figure 9.19](#) à résoudre pour v_o dans le circuit de [Figure 9.21](#) si:

a. $R_L = 10 \text{ k}\Omega$; et

b. $R_L = 1 \text{ k}\Omega$. (Indice: Assurez-vous que vos réponses sont cohérentes avec votre choix de circuit équivalent pour la diode – les différents circuits équivalents ne sont valables que pour des plages spécifiques de tension et de courant de diode. La réponse doit se situer dans la plage valide pour le circuit équivalent utilisé.)

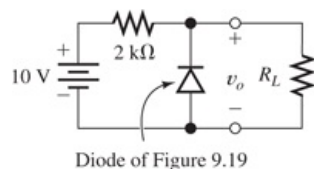


Figure 9.21

Circuit pour [Exercice 9.9](#).

Répondre

a. $v_o = 6,017 \text{ V}$;

b. $v_o = 3,333 \text{ V}$.

Exercice 9.10

Trouvez un modèle de circuit pour chaque segment de ligne indiqué dans [Figure 9.22\(a\)](#). Dessinez les modèles de circuits en identifiant les bornes a et b pour chaque circuit équivalent.

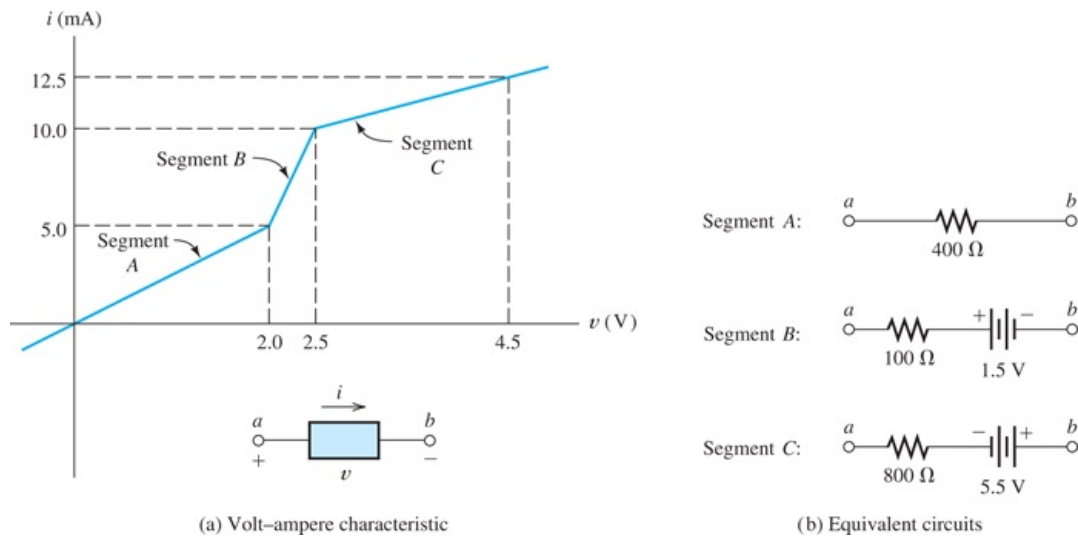


Figure 9.22

Dispositif non linéaire hypothétique pour [Exercice 9.10](#).

Répondre

Voir [Figure 9.22\(b\)](#). Notez la polarité des sources de tension par rapport aux bornes a et b .

Circuit équivalent à diode linéaire par morceaux simple

[Figure 9.23](#) montre un circuit équivalent linéaire par morceaux simple pour les diodes qui est souvent suffisamment précis. Il s'agit d'un circuit ouvert dans la zone de polarisation inverse et d'une chute de tension constante dans le sens direct. Ce modèle est équivalent à une batterie en série avec une diode idéale.

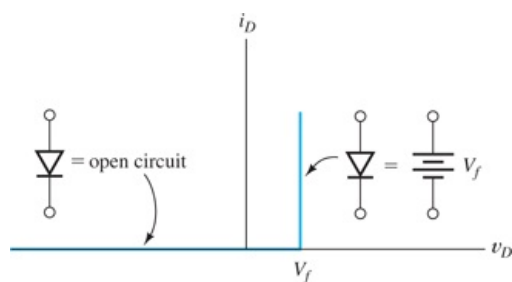



Figure 9.23

Équivalent simple par morceaux linéaire pour la diode.

9.6 Circuits redresseurs

Maintenant que nous avons présenté la diode et quelques méthodes d'analyse des circuits à diodes, nous allons considérer quelques circuits pratiques supplémentaires. Tout d'abord, nous considérons plusieurs types de **redresseurs**, qui convertissent le courant alternatif en courant continu. Ces redresseurs constituent la base des circuits électroniques **alimentations électriques** et les circuits de charge de batterie. En règle générale, une alimentation électrique prend l'énergie d'une source brute, qui est souvent la ligne électrique à courant alternatif de 60 Hz, et délivre des tensions continues stables à une charge telle que des circuits informatiques ou des circuits de télévision. D'autres applications des redresseurs sont le traitement du signal, comme la démodulation d'un signal radio. *Démodulation* est le processus de récupération du message, tel qu'un signal vocal ou vidéo.) Une autre application est la conversion de précision d'une tension alternative en tension continue dans un voltmètre électronique.

Circuits redresseurs demi-onde

Un **redresseur demi-onde** avec une source sinusoïdale et une charge résistive R_L est montré dans [Figure 9.24](#) . Lorsque la tension de la source $v_s(t)$ la tension de la source est positive, la diode se trouve dans la zone de polarisation directe. Si l'on suppose une diode idéale, la tension de la source apparaît aux bornes de la charge. Pour une diode réelle typique, la tension de sortie est inférieure à la tension de la source d'une quantité égale à la chute aux bornes de la diode, qui est d'environ 0,7 V pour les diodes au silicium à température ambiante. Lorsque la tension de la source est négative, la diode est polarisée en inverse et aucun courant ne circule dans la charge. Même pour les diodes réelles typiques, seul un très faible courant inverse circule. Ainsi, seuls les demi-cycles positifs de la tension de la source apparaissent aux bornes de la charge.

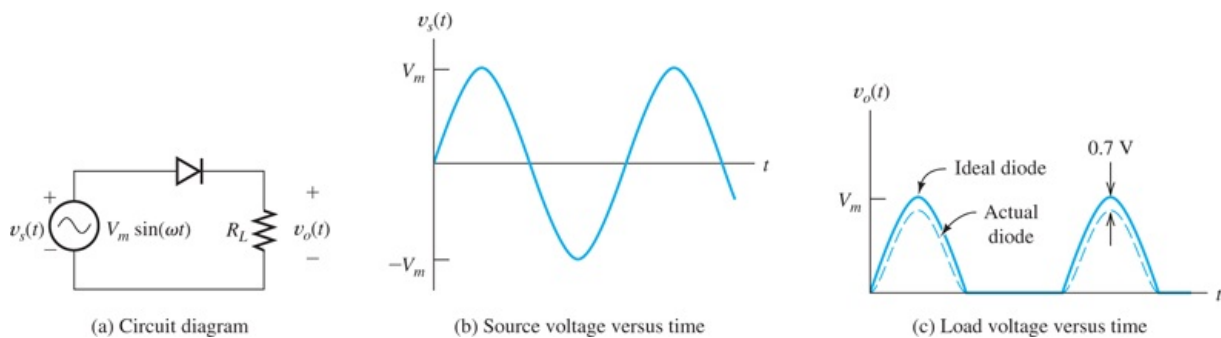


Figure 9.24

Redresseur demi-onde à charge résistive.

Circuit de charge de batterie.

Nous pouvons utiliser un redresseur demi-onde pour charger une batterie comme indiqué dans [Figure 9.25](#). Le courant circule à chaque fois que la tension de la source CA instantanée est supérieure à la tension de la batterie. Comme le montre la figure, il est nécessaire d'ajouter une résistance au circuit pour limiter l'amplitude du courant. Lorsque la tension de la source CA est inférieure à la tension de la batterie, la diode est polarisée en inverse et le courant est nul. Par conséquent, le courant ne circule que dans le sens qui charge la batterie.

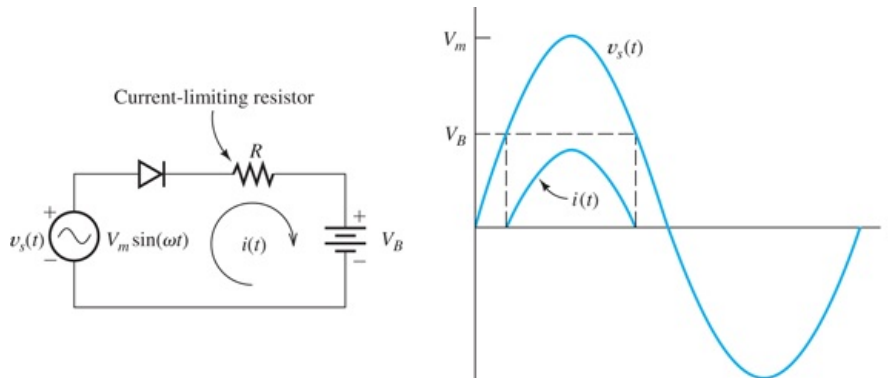


Figure 9.25

Redresseur demi-onde utilisé pour charger une batterie.

Redresseur demi-onde avec condensateur de lissage.

Souvent, nous souhaitons convertir une tension alternative en une tension continue presque constante pour l'utiliser comme alimentation pour les circuits électroniques. Une approche pour lisser la tension de sortie du redresseur consiste à placer une grande capacité sur les bornes de sortie du redresseur. Le circuit et les formes d'onde du courant et de la tension sont représentés dans [Figure 9.26](#).

Lorsque la source CA atteint un pic positif, le condensateur est chargé à la tension de crête (en supposant une diode idéale). Lorsque la tension de la source chute en dessous de la tension stockée sur le condensateur, la diode est polarisée en inverse et aucun courant ne la traverse. Le condensateur continue de fournir du courant à la charge, se déchargeant lentement jusqu'au prochain pic positif de l'entrée CA. Comme le montre la figure, le courant traverse la diode par impulsions qui rechargent le condensateur.

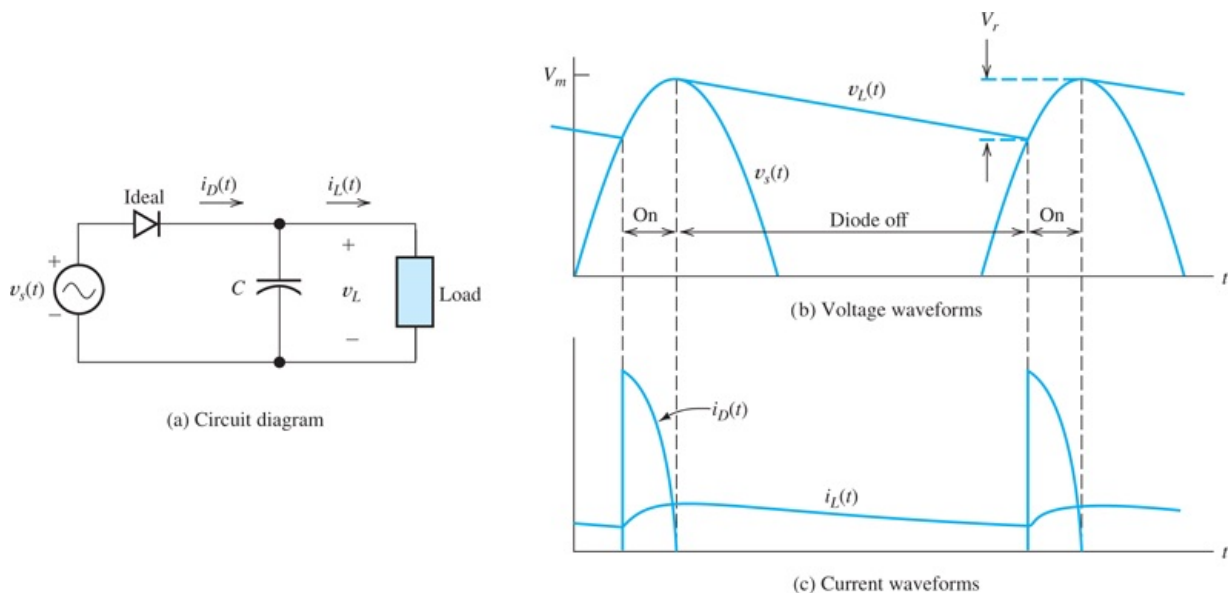


Figure 9.26

Redresseur demi-onde avec condensateur de lissage.

En raison du cycle de charge et de décharge, la tension de charge contient une petite composante alternative appelée **ondulation**.

Habituellement, il est souhaitable de minimiser l'amplitude de l'ondulation, nous choisissons donc la valeur de capacité la plus élevée

c'est pratique. Dans ce cas, le condensateur se décharge pendant presque tout le cycle et la charge retirée du condensateur pendant un cycle de décharge est

$$Q \approx j_{el} T \quad (9.8)$$

où j_{el} est le courant de charge moyen et T est la période de la tension alternative. Étant donné que la charge retirée du condensateur est le produit de la variation de tension et de la capacité, nous pouvons également écrire

$$Q = V_l C \quad (9.9)$$

où V_l est la tension d'ondulation crête à crête et C est la capacité. En égalisant les côtés droits de **Équations 9.8** et **9.9** nous permet de résoudre pour C :

$$C = \frac{I_L}{V_l} \quad (9.10)$$

En pratique, **Équation 9.10** est approximatif car le courant de charge varie et parce que le condensateur ne se décharge pas pendant un cycle complet. Cependant, elle fournit une bonne valeur de départ pour calculer la capacité nécessaire à la conception des circuits d'alimentation.

La tension moyenne fournie à la charge si un condensateur de lissage est utilisé est approximativement à mi-chemin entre les tensions minimale et maximale. Ainsi, en se référant à **Figure 9.26** est la tension de charge moyenne

$$V_L \approx V_m - \frac{V}{2} \quad (9.11)$$

Tension inverse de crête

Un aspect important des circuits redresseurs est le **tension inverse de crête (PIV)** à travers les diodes. Bien entendu, la spécification de claquage des diodes doit être supérieure à la PIV. Par exemple, dans le circuit demi-onde avec une charge résistive, illustré dans **Figure 9.24**, le PIV est V_m .

L'ajout d'un condensateur de lissage en parallèle avec la charge augmente le PIV à (environ) $2 V_m$. Se référant à **Figure 9.26**, pour le pic négatif de l'entrée CA, nous voyons que la polarisation inverse de la diode est la somme de la tension source et de la tension stockée sur le condensateur.

Circuits redresseurs à onde complète

Plusieurs **redresseur à onde complète** Les circuits sont d'usage courant. Une approche utilise deux sources de courant alternatif et deux diodes, comme illustré dans **Figure 9.27(a)**. Une caractéristique de ce diagramme est la **symbole de terre**. Habituellement dans circuits électroniques, de nombreux composants sont connectés à un point commun appelé *sol*. Souvent, le châssis contenant le circuit constitue la masse électrique. Par conséquent, **Figure 9.27(a)**, l'extrémité inférieure de R_L et le point entre les sources de tension sont connectés ensemble.

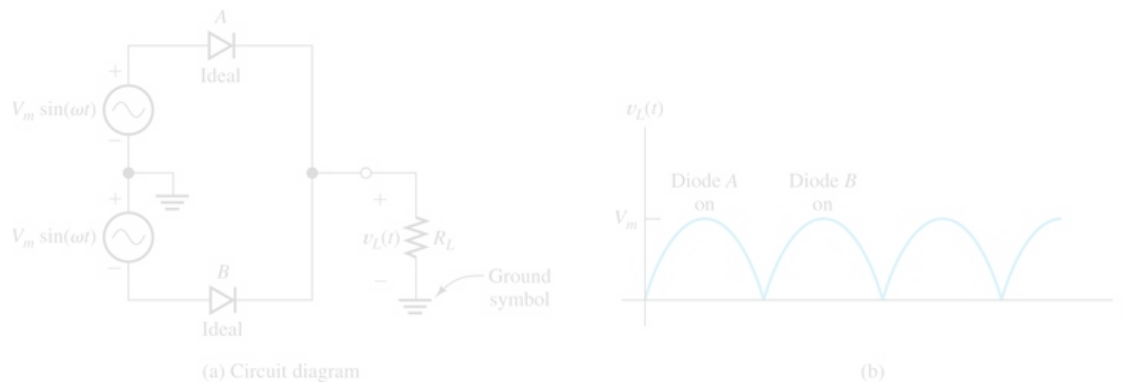




Figure 9.27

Redresseur à double alternance.

Un fil ou un autre conducteur, non représenté explicitement dans le schéma, relie tous les points connectés aux symboles de terre.

Lorsque la source supérieure applique une tension positive à l'extrémité gauche de la diode UN , la source inférieure applique une tension négative à l'extrémité gauche de la diode B , et vice versa. On dit que les sources sont **déphasées**. Le circuit est donc constitué de deux redresseurs demi-onde avec des tensions sources déphasées et une charge commune. Les diodes conduisent sur des demi-cycles alternés.

Habituellement, les deux tensions alternatives déphasées sont fournies par un **transformateur**. (Les transformateurs sont discutés dans [Chapitre 15](#) .) En plus de fournir les tensions alternatives déphasées, le transformateur permet également au concepteur ajuster V_m par sélection du rapport de tours. Ceci est important, car la tension alternative disponible n'est souvent pas d'une amplitude adaptée à la rectification directe. En général, une tension continue plus élevée ou plus basse est nécessaire.

Un deuxième type de redresseur à onde complète utilise le **pont de diodes** montré dans [Figure 9.28](#) . Lorsque la tension alternative, $V_m \sin(\omega t)$, est positif, le courant traverse la diode UN , puis à travers la charge, et revient à travers la diode B , comme indiqué sur la figure. Pour la polarité opposée, le courant circule à travers les diodes C et D . Notez que dans les deux cas, le courant circule dans la même direction à travers la charge.

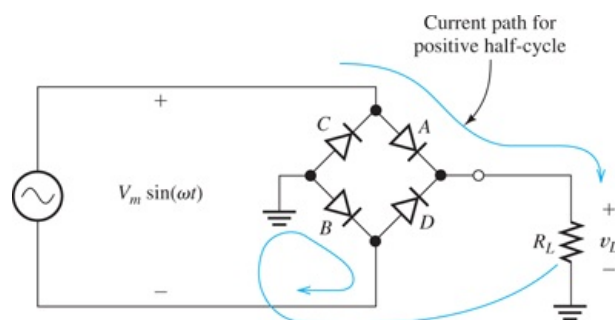



Figure 9.28

Redresseur à double alternance à pont de diodes.

En règle générale, aucune des bornes de la source CA n'est reliée à la terre. Cela est nécessaire si un côté de la charge doit être relié à la terre, comme indiqué sur la figure. (Si la source CA et la charge ont une connexion à la terre commune, une partie du circuit est court-circuitée.)

Si nous souhaitons lisser la tension aux bornes de la charge, un condensateur peut être placé en parallèle avec la charge, de manière similaire au circuit demi-onde décrit précédemment. Dans les circuits à onde complète, le condensateur se décharge pendant seulement un demi-cycle avant d'être rechargé. Par conséquent, la capacité requise est deux fois moins importante dans le circuit à onde complète que dans le circuit demi-onde. Par conséquent, nous modifions [Équation 9.10](#)

 pour obtenir

$$C = \frac{I_L}{2V_f}$$

(9.12)

pour le redresseur à double alternance avec filtre capacitif.

Exercice 9.11

Considérez le circuit de charge de la batterie de [Figure 9.25](#)  avec $V_m = 20 \text{ V}$, $R = 10 \Omega$, et $V_B = 14 \text{ V}$.


- Trouvez le courant de crête en supposant une diode idéale.
- Trouvez le pourcentage de chaque cycle pendant lequel la diode est à l'état passant.

Répondre

a. $I_{\text{culminer}} = 600 \text{ mA}$;

b. la diode est allumée pendant 25,3 pour cent de chaque cycle.

Exercice 9.12

Un circuit d'alimentation est nécessaire pour fournir 0,1 A et 15 V (en moyenne) à une charge. La source de courant alternatif a une fréquence de 60 Hz. Supposons que le circuit de [Figure 9.26](#)  doit être utilisé. L'ondulation crête à crête La tension doit être de 0,4 V. Au lieu de supposer une diode idéale, prévoyez 0,7 V pour la chute de tension directe de la diode. Trouvez la tension alternative de crête V_m nécessaire et la valeur approximative du condensateur de lissage. *Indice:* Pour obtenir une tension de charge moyenne de 15 V avec une ondulation de 0,4 V, concevez une tension de charge de pointe de 15,2 V.)

Répondre

$V_m = 15,9$, $C = 4166 \mu\text{F}$.

Exercice 9.13

Répétez [Exercice 9.12](#)  en utilisant le circuit de [Figure 9.28](#)  avec le condensateur de lissage en parallèle avec la charge R_L .

Répondre

$V_m = 16,6$, $C = 2083 \mu\text{F}$.

9.7 Circuits de mise en forme d'ondes

Une grande variété de **circuits de mise en forme d'onde** sont utilisés dans les systèmes électroniques. Ces circuits servent à transformer une forme d'onde en une autre. On trouve de nombreux exemples de circuits de mise en forme d'onde dans les émetteurs et récepteurs de télévision ou de radar. Dans cette section, nous examinons quelques exemples de circuits de mise en forme d'onde qui peuvent être construits avec des diodes.

Circuits Clipper

Un circuit d'écrêtage « coupe » une partie de la forme d'onde d'entrée pour produire la forme d'onde de sortie.

Les diodes peuvent être utilisées pour former **circuits de coupe-bordures**, dans lequel une partie d'une forme d'onde de signal d'entrée est « coupée ».

Par exemple, le circuit de [Figure 9.29](#) coupe toute partie de la forme d'onde d'entrée supérieure à 6 V ou inférieure à -9 V. (Nous supposons des diodes idéales.) Lorsque la tension d'entrée est comprise entre -9 et +6 V, les deux diodes sont éteintes et aucun courant ne circule. Il n'y a donc pas de chute de tension R et la tension de sortie v_o est égal à la tension d'entrée v_{in} . D'autre part, lorsque v_{in} est supérieur à 6 V, diode A est allumée et la tension de sortie est de 6 V, car la diode relie la batterie de 6 V aux bornes de sortie. De même, lorsque v_{in} est inférieur à -9 V, diode B est allumée et la tension de sortie est -9 V. La forme d'onde de sortie résultant d'une entrée sinusoïdale de 15 V de crête est représentée dans [Figure 9.29\(b\)](#), et la caractéristique de transfert du circuit est représentée dans [Figure 9.29\(c\)](#).

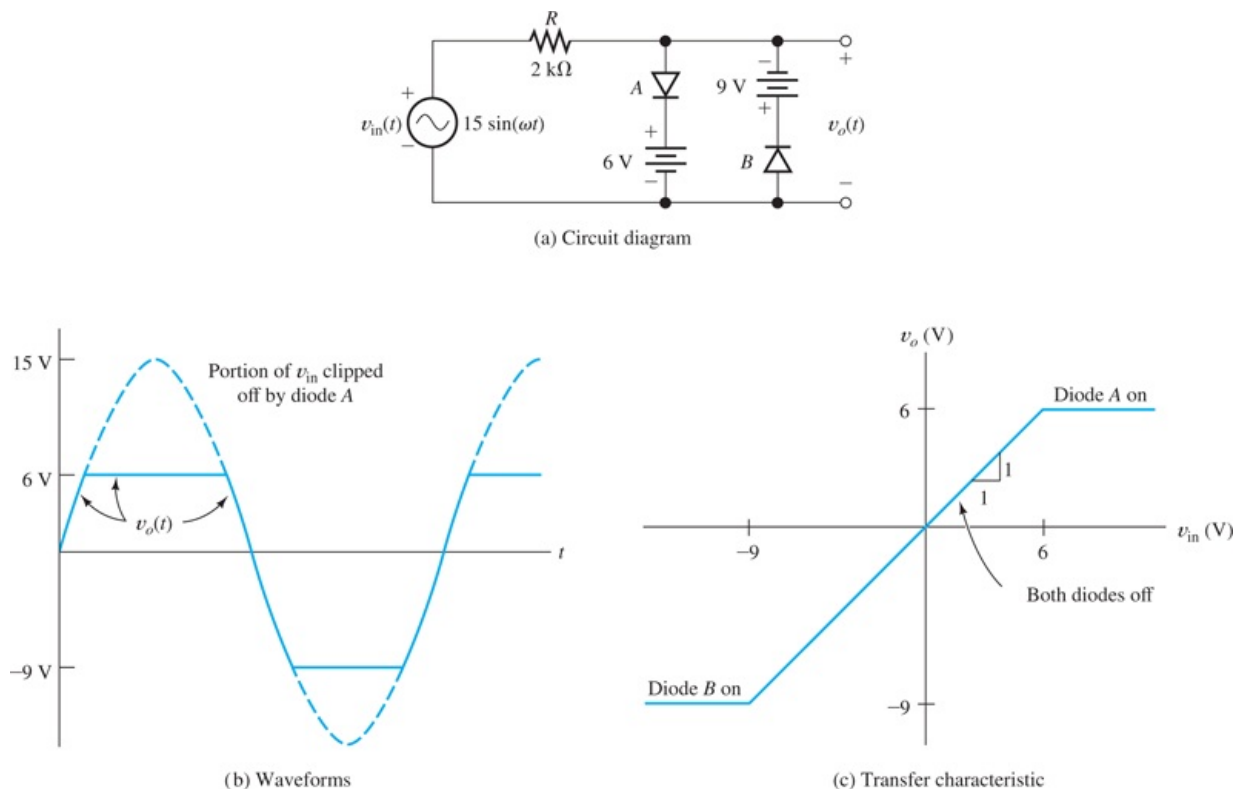





Figure 9.29

Circuit de tondeuse.

La résistance R est sélectionnée suffisamment grande pour que le courant direct de la diode soit dans des limites raisonnables (généralement quelques milliampères), mais suffisamment petit pour que le courant inverse de la diode entraîne un courant négligeable.

Chute de tension. Souvent, nous constatons qu'une large gamme de valeurs de résistance fournit des performances satisfaisantes dans un circuit donné.

Dans [Figure 9.29](#) , nous avons supposé des diodes idéales. Si des diodes au silicium à faible signal sont utilisées, nous nous attendons à une chute de tension directe de 0,6 ou 0,7 V, nous devons donc réduire la tension des piles pour compenser. De plus, les piles ne sont pas souhaitables pour une utilisation dans les circuits si elles peuvent être évitées, car elles peuvent nécessiter un remplacement périodique. Ainsi, une meilleure conception utilise des diodes Zener au lieu de piles. Circuits pratiques équivalents à [Figure 9.29](#)

 sont affichés dans [Figure 9.30](#)  Les diodes Zener sont étiquetées avec leurs tensions de claquage.

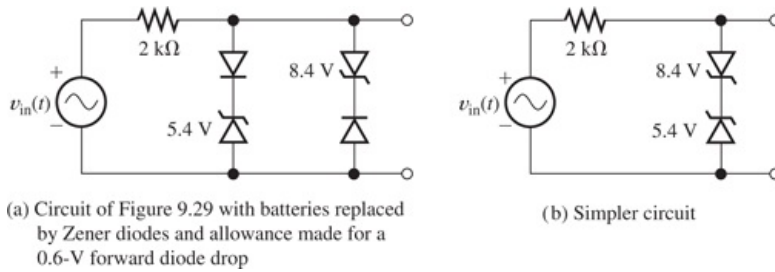



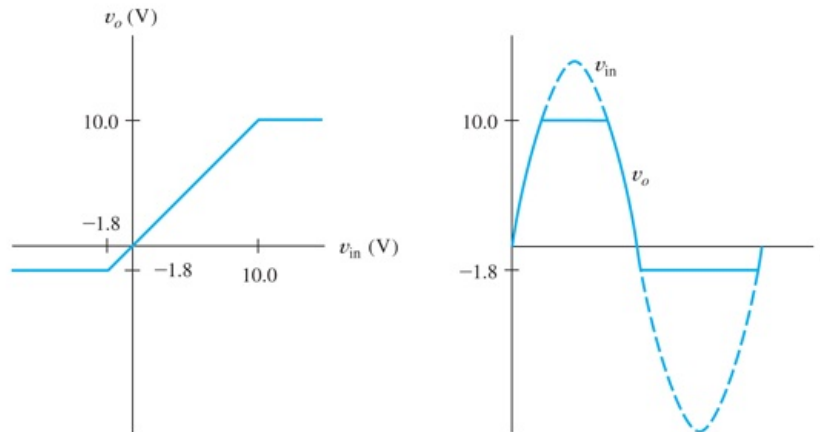
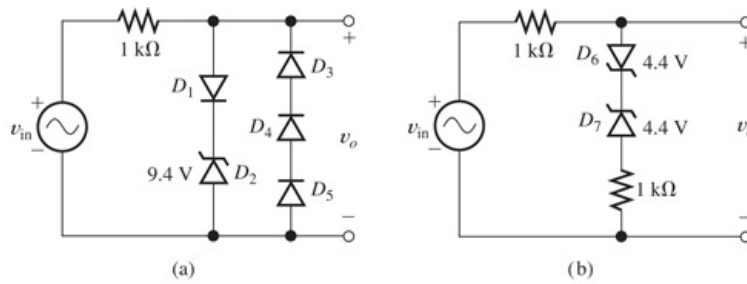
Figure 9.30

Des circuits avec des performances presque identiques à celles du circuit de [Figure 9.29](#) .

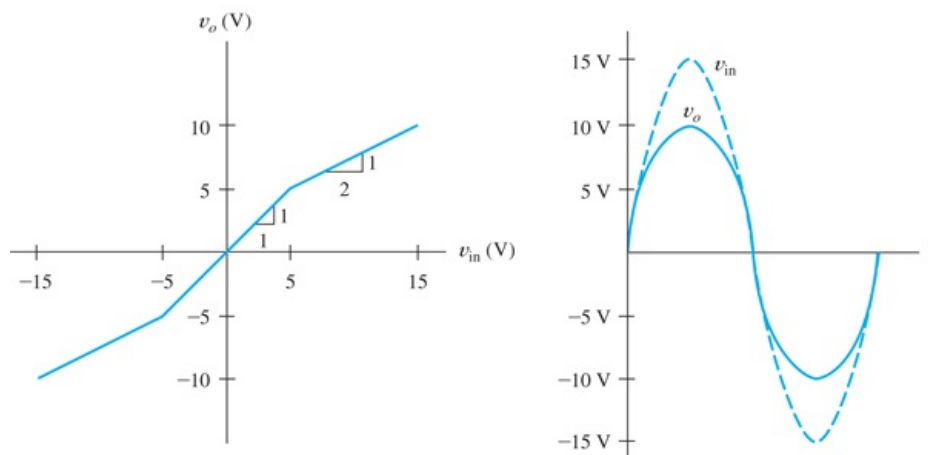
Exercice 9.14

- a. Esquisser les caractéristiques de transfert à l'échelle pour les circuits de **Figure 9.31(a)** Chute de tension directe V pour les diodes.

et(b) . Autoriser un 0,6-



(c) Answers for circuit of part (a)



(d) Answers for circuit of part (b)

Figure 9.31

Voir **Exercice 9.14** .

- b. Esquissez la forme d'onde de sortie à l'échelle si $v_{in}(t) = 15 \sin(\omega t)$.

Répondre

- a. Voir **Figure 9.31(c)** ;
b. voir **Figure 9.31(d)** .

Exercice 9.15

Concevez des circuits de découpage qui ont les caractéristiques de transfert indiquées dans

un **Figure 9.32(a)** et

b. Figure 9.32(b) Prévoyez une chute de tension de 0,6 V dans le sens direct pour les diodes. [Indice pour la partie (b) : Inclure une résistance en série avec la diode qui commence à conduire à $v_{\text{dans}} = 3$ V pour obtenir la pente requise pour la section entre $v_{\text{dans}} = 3$ V et 6 V.]

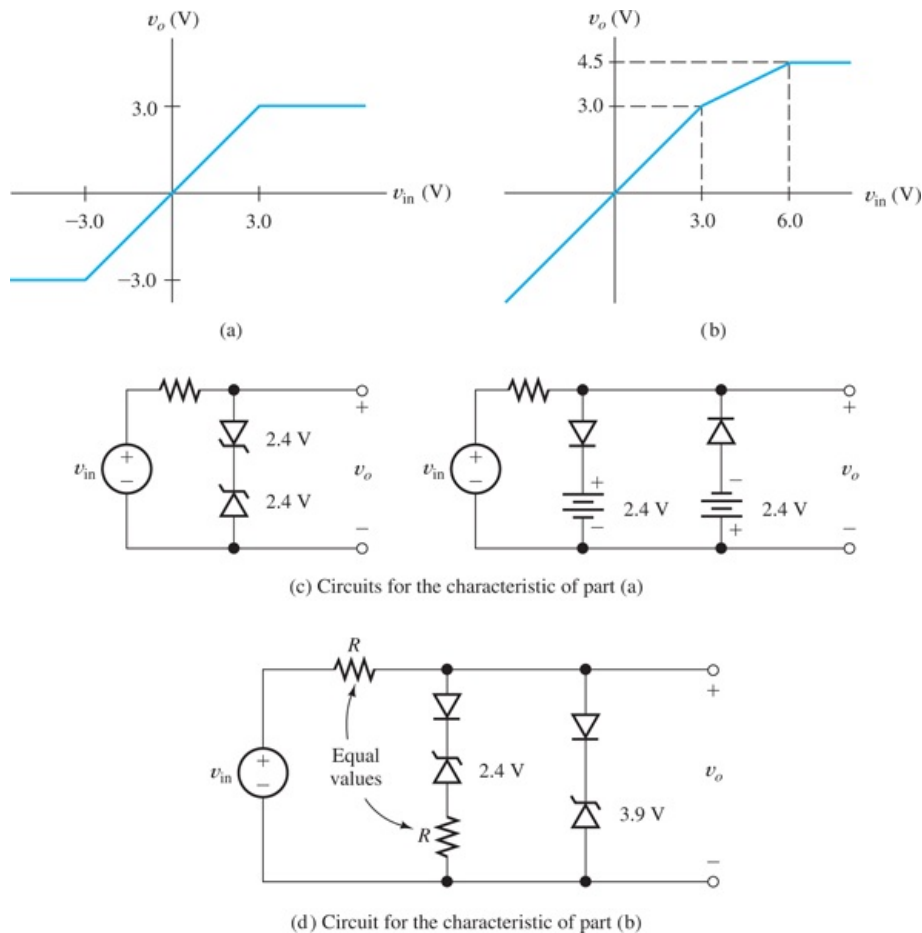


Figure 9.32

Voir **Exercice 9.15**.

Répondre

a. Voir **Figure 9.32(c)**;

b. voir **Figure 9.32(d)**.

Circuits de serrage

Un autre circuit de mise en forme d'onde de diode est le **circuit de serrage**, qui est utilisé pour ajouter une composante continue à une forme d'onde d'entrée alternative de sorte que les pics positifs (ou négatifs) soient forcés de prendre une valeur spécifiée. En d'autres termes, les pics de la forme d'onde sont « fixés » à une valeur de tension spécifiée. Un exemple de circuit est présenté dans **Figure 9.33**

. Dans ce circuit, les pics positifs sont fixés à -5 V.

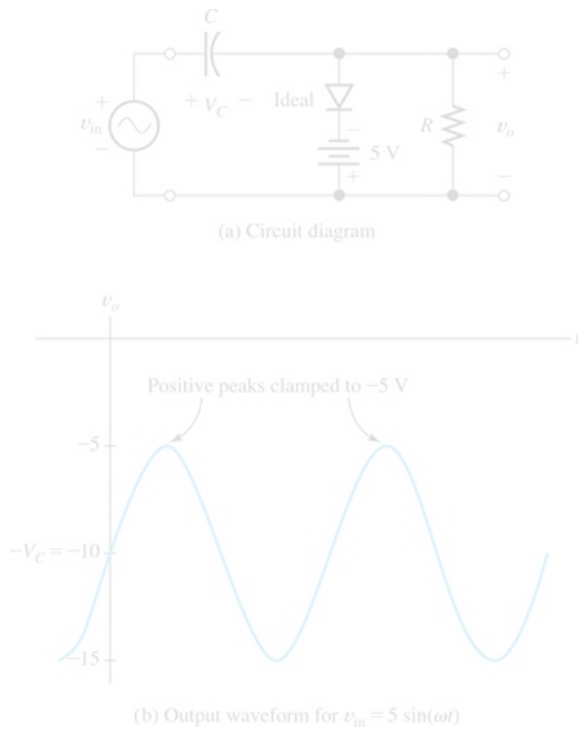


Figure 9.33

Exemple de circuit de serrage.

Dans un circuit de serrage, une tension continue variable est ajoutée à la forme d'onde d'entrée de sorte que l'un des pics de la sortie soit fixé à une valeur spécifiée.

La capacité est une valeur importante, elle ne se décharge donc que très lentement et nous pouvons considérer que la tension aux bornes du condensateur est constante. Comme la capacité est importante, elle a une très faible impédance pour le signal d'entrée CA. La tension de sortie du circuit est donnée par

$$v_{out}(t) = v_{dans}(t) - V_C \quad (9.13)$$

Si une oscillation positive du signal d'entrée tente de forcer la tension de sortie à devenir supérieure à -5 V , la diode conduit, augmentant la valeur de V_C . Ainsi, le condensateur est chargé à une valeur qui ajuste la valeur maximale de la tension de sortie à -5 V . Une grande résistance R est prévu pour que le condensateur puisse se décharger lentement. Cela est nécessaire pour que le circuit puisse s'ajuster si la forme d'onde d'entrée change vers une amplitude de crête plus petite.

Bien sûr, nous pouvons modifier la tension à laquelle le circuit se bloque en modifiant la tension de la batterie. L'inversion du sens de la diode provoque le blocage du pic négatif au lieu du pic positif. Si la tension de blocage souhaitée nécessite que la diode soit polarisée en inverse, il est nécessaire de ramener la résistance de décharge à une tension d'alimentation CC appropriée pour garantir que la diode conduit et effectue l'opération de blocage. De plus, il est souvent plus pratique d'utiliser des diodes Zener plutôt que des batteries. Un circuit comprenant ces caractéristiques est illustré dans [Figure 9.34](#)



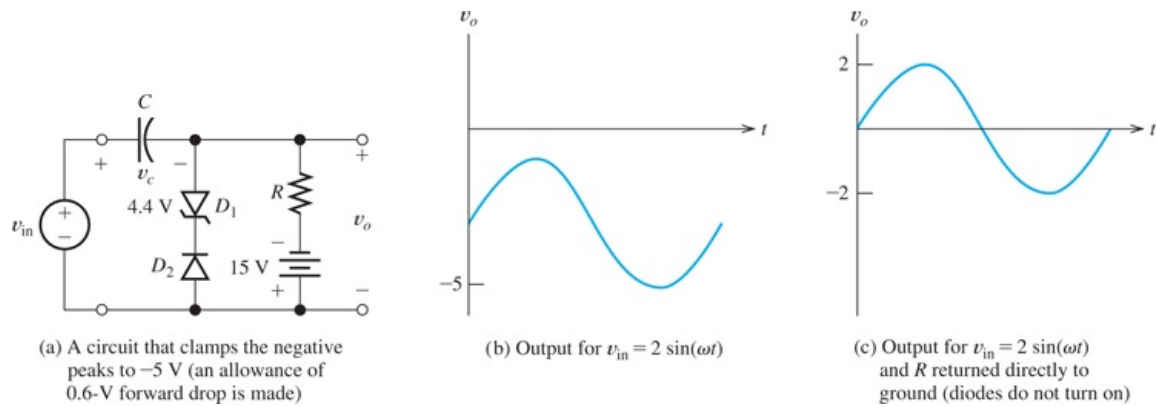


Figure 9.34

Voir [Exercice 9.16](#)

Exercice 9.16

Considérez le circuit de [Figure 9.34\(a\)](#) . Supposons que la capacité soit suffisamment grande pour que la tension à travers, il ne se décharge pas à travers R sensiblement au cours d'un cycle d'entrée.

- Quelle est la tension de sortie à l'état stable si $v_{dans}(t) = 0$?
- Esquissez la sortie à l'état stable à l'échelle en fonction du temps si $v_{dans}(t) = 2 \sin(\omega t)$.
- Supposons que la résistance soit ramenée directement à la terre au lieu de -15 V (c'est-à-dire, remplacer la source de 15 V par un court-circuit). Dans ce cas, dessinez la sortie à l'état stable en fonction du temps si $v_{dans}(t) = 2 \sin(\omega t)$.

Répondre

- Pour $v_{dans}(t) = 0$, nous avons $v_{out} = -5$ V;
- voir [Figure 9.34\(b\)](#) ;
- cc voir [Figure 9.34\(c\)](#) .

Exercice 9.17

Concevez un circuit qui fixe les pics négatifs d'un signal alternatif à $+6$ V. Vous pouvez utiliser des piles, des résistances et des condensateurs de n'importe quelle valeur en plus des diodes Zener ou conventionnelles. Prévoyez $0,6$ V pour la chute de tension directe.

Répondre

Une solution est montrée dans [Figure 9.35](#) D'autres solutions sont possibles.

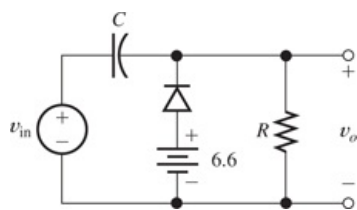


Figure 9.35

Réponse pour [Exercice 9.17](#) .

Exercice 9.18

Répéter [Exercice 9.17](#) pour un circuit qui fixe les pics positifs à +6 V .

Répondre

Une solution est montrée dans [Figure 9.36](#) . D'autres solutions sont possibles.

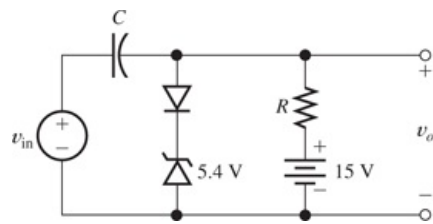


Figure 9.36



Réponse pour [Exercice 9.18](#) .

9.8 Circuits équivalents linéaires à faible signal


Nous rencontrerons de nombreux exemples de circuits électroniques dans lesquels des tensions d'alimentation en courant continu sont utilisées pour **bias** un dispositif non linéaire à un point de fonctionnement, et un petit signal alternatif est injecté dans le circuit. Nous divisons souvent l'analyse de tels circuits en deux parties. Tout d'abord, nous analysons le circuit à courant continu pour trouver le point de fonctionnement. Dans cette analyse des conditions de polarisation, nous devons traiter les aspects non linéaires du dispositif. Dans la deuxième partie de l'analyse, nous considérons le petit signal alternatif. Étant donné que pratiquement toute caractéristique non linéaire est approximativement linéaire (droite) si nous considérons une partie suffisamment petite, nous pouvons trouver un **circuit équivalent à faible signal linéaire** pour le dispositif non linéaire à utiliser dans l'analyse CA.

Souvent, la principale préoccupation lors de la conception de tels circuits est de savoir ce qui arrive au signal alternatif. Les tensions d'alimentation en courant continu polarisent simplement l'appareil à un point de fonctionnement approprié. Par exemple, dans une radio portable, l'intérêt principal est le signal reçu, démodulé, amplifié et délivré au haut-parleur. Les courants continus fournis par la batterie sont nécessaires pour que les appareils remplissent leur fonction prévue sur les signaux alternatifs. Cependant, la majeure partie de notre temps de conception est consacrée à la prise en compte des petits signaux alternatifs à traiter.

Le circuit équivalent linéaire à faible signal est une approche d'analyse importante qui s'applique à de nombreux types de circuits électroniques. Dans cette section, nous démontrons les principes avec un circuit à diode simple. **Chapitres 11**

 **et 12** , nous utilisons des techniques similaires pour les circuits amplificateurs à transistors.

Le circuit équivalent à faible signal pour une diode est une résistance.

Maintenant, nous montrons que dans le cas d'une diode, le circuit équivalent à faible signal est simplement constitué d'une résistance. Considérons la caractéristique de la diode illustrée dans **Figure 9.37** . Supposons que la tension d'alimentation CC résulte en opération au **point de repos**, ou **Q point**, indiqué sur la caractéristique. Ensuite, un petit signal alternatif injecté dans le circuit fait osciller le point instantané de fonctionnement légèrement au-dessus et en dessous de la **Q** indiqué.

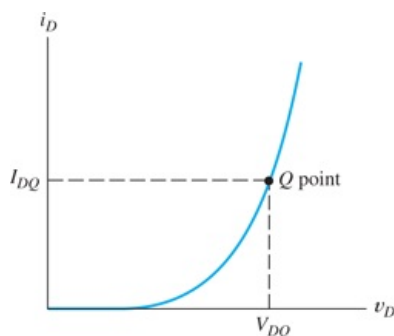


Figure 9.37

Caractéristique de la diode, illustrant la **Q** point.

Pour un signal alternatif suffisamment faible, la caractéristique est droite. Ainsi, nous pouvons écrire

$$\Delta i_D \approx \left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q \Delta v_D \quad (9.14)$$

où Δi_D est la petite variation du courant de diode par rapport à la **Q**-point de courant provoqué par le signal alternatif, Δv_D est le changement de la tension de la diode par rapport à la **Q**-valeur en points, et $\left. di_D / dv_D \right|_Q$ est la pente de la caractéristique de la diode évaluée à la **Q** point. Notez que la pente a les unités de résistance inverse.

Par conséquent, nous définissons la **résistance dynamique** de la diode comme

$$r_d = \left[\frac{dV_D}{dI_D} \right]_{Q}^{-1} \quad (9.15)$$

et l'équation 9.14 devient

$$\Delta I_D \approx \frac{\Delta V_D}{r_d} \quad (9.16)$$

Nous trouvons pratique d'abandonner la notation Δ et de désigner les variations de courant et de tension à partir de la Q -valeurs ponctuelles comme v_d et i_d . (Notez que des indices minuscules sont utilisés pour les petits changements de courant et de tension.) Par conséquent, pour ces petits signaux alternatifs, nous écrivons

$$i_d = \frac{v_d}{r_d} \quad (9.17)$$

Comme le montre l'équation 9.15, nous pouvons trouver la résistance équivalente de la diode pour le petit signal alternatif comme l'inverse de la pente de la courbe caractéristique. Le courant d'une diode de jonction est donné par l'équation de Shockley (équation 9.1), répété ici pour plus de commodité :

$$I_D = I_{S0} \left[\exp \frac{V_D}{nV_T} - 1 \right]$$

La pente de la caractéristique peut être trouvée en différenciant l'équation de Shockley, ce qui donne

$$\frac{dI_D}{dV_D} = I_{S0} \frac{1}{nV_T} \exp \frac{V_D}{nV_T} \quad (9.18)$$

En remplaçant la tension à la Q -point, nous avons

$$\left. \frac{dI_D}{dV_D} \right|_Q = I_{S0} \frac{1}{nV_T} \exp \frac{V_{DQ}}{nV_T} \quad (9.19)$$

Pour les conditions de polarisation directe avec V_{DQ} au moins plusieurs fois plus grand que V_T , le -1 entre parenthèses de l'équation de Shockley est négligeable. Ainsi, nous pouvons écrire

$$I_{DQ} \approx I_{S0} \exp \frac{V_{DQ}}{nV_T} \quad (9.20)$$


En remplaçant ceci par l'équation 9.19, nous avons

$$\left. \frac{dI_D}{dV_D} \right|_Q = \frac{I_{DQ}}{nV_T} \quad (9.21)$$

Prendre la réciproque et la remplacer par l'équation 9.15 de l'équation 9.15, nous avons la résistance dynamique à petit signal la diode à la Q -indiquer:

$$r_d = \frac{nV_T}{I_{DQ}} \quad (9.22)$$

Pour résumer, pour les signaux qui provoquent de petits changements par rapport à la Q -point, nous pouvons traiter la diode simplement comme une résistance linéaire. La valeur de la résistance est donnée par l'équation 9.22 (à condition que la diode soit biaisée vers l'avant). Comme le Q -point courant I_{DQ} augmente, la résistance devient plus petite. Ainsi, un courant alternatif

une tension d'amplitude fixe produit un courant alternatif qui a une amplitude plus élevée que la Qle point se déplace plus haut. Ceci est illustré dans [Figure 9.38](#) .

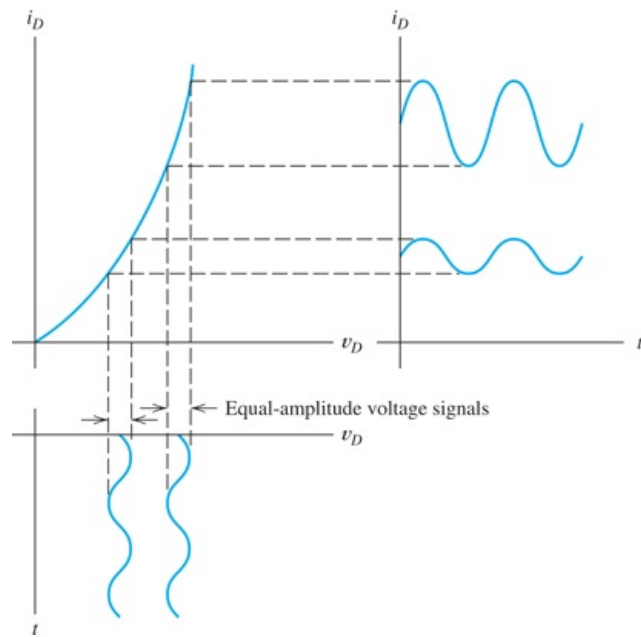



Figure 9.38

Comme le Qle point se déplace plus haut, une tension alternative d'amplitude fixe produit un courant alternatif de plus grande amplitude.

Notation des courants et des tensions dans les circuits électroniques

Peut-être devrions-nous revoir la notation que nous avons utilisée pour les courants et les tensions des diodes, car nous utilisons une notation similaire tout au long de ce livre :

- v_d et i_d représentent la tension et le courant instantanés totaux de la diode. Parfois, nous pouvons souhaiter souligner la nature variable dans le temps de ces quantités, et nous utilisons alors $v_d(t)$ et $i_d(t)$.
- V_{DQ} et I_{DQ} représente le courant et la tension de la diode CC au point de repos.
- v_d et i_d représentent les (petits) signaux alternatifs. Si nous souhaitons souligner leur nature variable dans le temps, nous utilisons $v_d(t)$ et $i_d(t)$.

Cette notation est illustrée pour la forme d'onde montrée dans [Figure 9.39](#) .

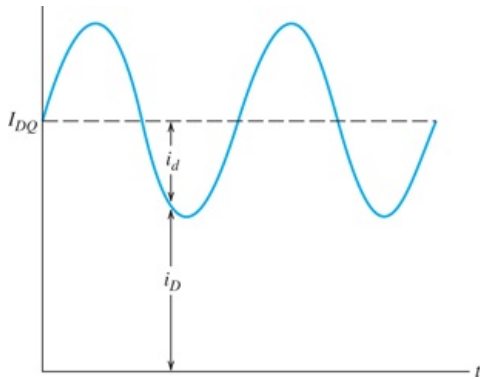


Figure 9.39

Illustration des courants de diodes.

Exercice 9.19

Calculer la résistance dynamique d'une diode de jonction ayant $n=1$ à une température de 300 K pendant $i_{DQ} =$

a. 0,1 mA;

b. 1 mA;

environ 10 mA.



Répondre

a. 260 Ω ;

b. 26 Ω ;

c. 2,6 Ω .

Atténuateur à tension contrôlée

Maintenant, nous considérons un exemple d'analyse de circuit équivalent linéaire pour le circuit relativement simple, mais utile, illustré dans [Figure 9.40](#) . La fonction de ce circuit est de produire un signal de sortie $v_{out}(t)$ c'est une fraction variable du signal d'entrée alternatif $v_{dans}(t)$. Il est similaire au diviseur de tension résistif (voir [Section 2.3](#) ) , sauf que dans ce cas, nous voulons que le rapport de division dépende d'une autre tension V_C appelé le **signal de commande**. Nous appelons le processus de réduction de l'amplitude d'un signal **atténuation**. Ainsi, le circuit à étudier est appelé un **atténuateur à tension contrôlée**. Le degré d'atténuation dépend de la valeur de la tension de commande continue V_C .

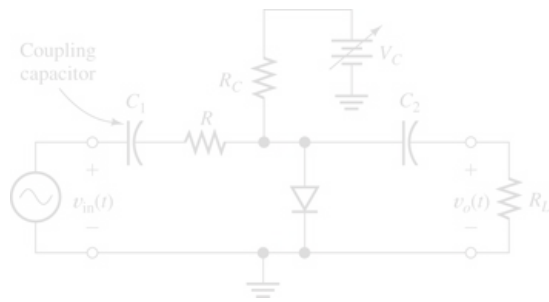


Figure 9.40

Atténuateur variable utilisant une diode comme résistance contrôlée.

Notez que le signal alternatif à atténuer est connecté au circuit par un **condensateur de couplage**. La tension de sortie est connectée à la charge R_L par un deuxième condensateur de couplage. Rappelons que l'impédance d'une capacité est donnée par

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C}$$

dans lequel ω est la fréquence angulaire du signal alternatif. Nous sélectionnons des valeurs de capacité suffisamment grandes pour qu'elles soient effectivement des courts-circuits pour le signal alternatif. Cependant, les condensateurs de couplage sont des circuits ouverts pour le courant continu. Ainsi, le point de fonctionnement au repos (Q point) de la diode n'est pas affecté par la source du signal ou la charge. Cela peut être important pour un circuit qui doit fonctionner pour diverses sources et charges qui pourraient affecter le Q point. De plus, les condensateurs de couplage empêchent les courants continus (parfois indésirables) de circuler dans la source ou la charge.

En raison des condensateurs de couplage, nous devons seulement considérer V_C , R_C , et la diode pour effectuer l'analyse de polarisation

pour trouver le Q point. Par conséquent, le circuit CC est représenté dans **Figure 9.41**



Nous pouvons utiliser n'importe lequel des

techniques discutées plus tôt dans ce chapitre pour trouver le Q point. Une fois qu'il est connu, le Q -valeur ponctuelle du

courant de la diode $j\omega Q$ peut être substitué par **Équation 9.22** pour déterminer la résistance dynamique de la diode.

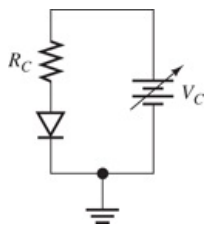


Figure 9.41

Circuit CC équivalent à **Figure 9.40** pour Q -analyse en points.

Maintenant, nous tournons notre attention vers le signal alternatif. La source de commande CC doit être considérée comme un court-circuit pour les signaux alternatifs. La source du signal provoque la circulation d'un courant alternatif à travers le V_C source. Cependant, V_C est une source de tension continue et, par définition, la tension à ses bornes est constante. *Étant donné que la source de tension continue possède une composante alternative de courant, mais pas de tension alternative, la source de tension continue est équivalente à un court-circuit pour les signaux alternatifs.* Il s'agit d'un concept important que nous utiliserons à plusieurs reprises pour dessiner des circuits équivalents en courant alternatif.

Les sources CC et les condensateurs de couplage sont remplacés par des courts-circuits dans les circuits équivalents CA à faible signal. Les diodes sont remplacées par leurs résistances dynamiques.

Le circuit équivalent pour les signaux alternatifs est illustré dans **Figure 9.42**. La source de contrôle et les condensateurs ont été remplacés par des courts-circuits et la diode a été remplacée par sa résistance dynamique.

Le circuit est un diviseur de tension et peut être analysé par une analyse de circuit linéaire ordinaire. La combinaison parallèle de R_C , R_L , et r_d est désigné comme R_p , donné par

$$R_p = \frac{1}{1/R_C + 1/R_L + 1/r_d} \quad (9.23)$$

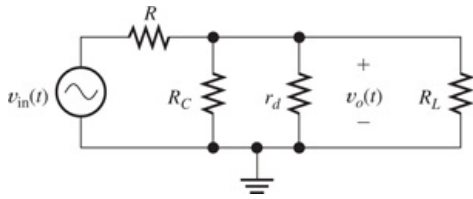


Figure 9.42

Circuit équivalent à faible signal alternatif pour [Figure 9.40](#).

Ensuite, le gain de tension du circuit est

$$UN_V = \frac{V_{out}}{V_{dans}} = \frac{R_p}{R + R_p} \quad (9.24)$$

(Bien sûr, UN_V est inférieur à l'unité.)

Exercice 9.20

Supposons que le circuit de [Figure 9.40](#) a $R = 100 \, \Omega$, $R_C = 2 \, \text{k}\Omega$, et $R_L = 2 \, \text{k}\Omega$. La diode a $n = 1$ et est à une température de 300 K. Aux fins de Q-analyse ponctuelle, supposons une tension de diode constante de 0,6 V. Trouvez la Q-valeur ponctuelle du courant de la diode et UN_V pour $V_C =$

a. 1,6 V;

b. 10,6 V.

Répondre

a. $i_{DQ} = 0,5 \, \text{mA}$ et $UN_V = 0,331$;

b. $i_{DQ} = 5 \, \text{mA}$ et $UN_V = 0,0492$.

Une application des atténuateurs à tension contrôlée se produit dans les enregistreurs vocaux numériques dans lesquels le signal audio d'un microphone est amplifié à un niveau approprié, converti sous forme numérique dans un convertisseur analogique-numérique (CAN) et stocké dans une mémoire numérique. (La conversion analogique-numérique est abordée dans [Section 6.10](#), à partir de la page 331.) Un problème fréquemment rencontré lors de l'enregistrement audio est que certaines personnes parlent doucement, tandis que d'autres parlent fort. De plus, certaines personnes peuvent être loin du microphone, tandis que d'autres en sont proches. Si un amplificateur à gain fixe est utilisé entre le microphone et le convertisseur analogique-numérique, soit les signaux faibles sont faibles par rapport à l'erreur de quantification, soit les signaux forts dépassent les limites maximales du convertisseur analogique-numérique, ce qui entraîne une distorsion importante.

Une solution consiste à utiliser un atténuateur à tension contrôlée dans un système tel que celui illustré dans [Figure 9.43](#). L'atténuateur est placé entre le microphone et un amplificateur à gain élevé. Lorsque le signal enregistré est faible, la tension de commande est faible et l'atténuation est très faible. En revanche, lorsque le signal est fort, la tension de commande est élevée, de sorte que le signal est atténué, ce qui évite toute distorsion. La tension de commande est générée en redressant la sortie de l'amplificateur. Le signal redressé est filtré par une constante de temps longue. RC filtre de sorte que l'atténuation réponde à l'amplitude moyenne du signal plutôt que de s'ajuster trop rapidement. Avec une conception appropriée, ce système peut fournir un signal acceptable au niveau du convertisseur pour une large gamme d'amplitudes de signal d'entrée.

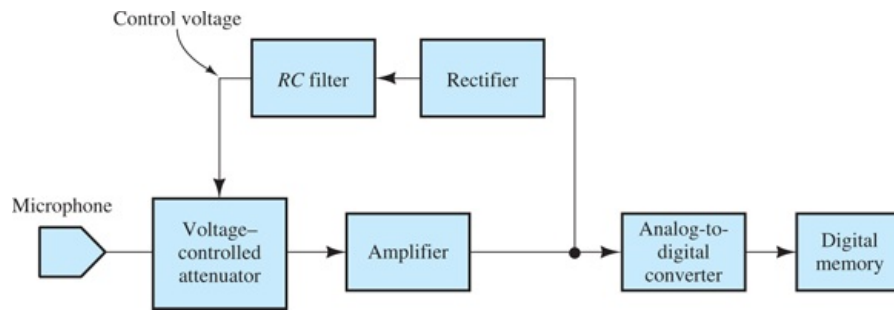


Figure 9.43

L'atténuateur contrôlé en tension est utile pour maintenir une amplitude de signal appropriée au niveau de la tête d'enregistrement.

Bien que le circuit à diodes que nous avons discuté soit pratique pour illustrer les principes, les amplificateurs à transistors à circuit intégré dans lesquels le gain est contrôlé en changeant le Q -les transistors à points offrent de meilleures performances. Citons par exemple l'AN-934 d'Analog Devices et le MAX9814 de Maxim Integrated Products.

Résumé

1. Une $p-n$ diode à jonction est un dispositif à deux bornes qui conduit facilement le courant dans un sens (de l'anode à la cathode), mais pas dans le sens opposé. La caractéristique volt-ampère comporte trois régions : polarisation directe, polarisation inverse et claquage inverse.
2. L'équation de Shockley relie le courant et la tension dans une $p-n$ diode de jonction.
3. Les circuits non linéaires, tels que ceux contenant une diode, peuvent être analysés à l'aide de la technique de la ligne de charge.
4. Les diodes Zener sont destinées à fonctionner dans la région de claquage inverse comme références à tension constante.
5. Les régulateurs de tension sont des circuits qui produisent une tension de sortie presque constante tout en fonctionnant à partir d'une source variable.
6. Le modèle de diode idéale est un court-circuit (activé) si le courant circule dans le sens direct et un circuit ouvert (désactivé) si la tension est appliquée dans le sens inverse.
7. Dans la méthode des états supposés, nous supposons un état pour chaque diode (allumée ou éteinte), analysons le circuit et vérifions si les états supposés sont cohérents avec les directions du courant et les polarités de la tension. Ce processus est répété jusqu'à ce qu'un ensemble d'états valide soit trouvé.
8. Dans un modèle linéaire par morceaux pour un dispositif non linéaire, la caractéristique volt-ampère est approximée par des segments de droite. Sur chaque segment, le dispositif est modélisé comme une source de tension en série avec une résistance.
9. Les circuits redresseurs peuvent être utilisés pour charger des batteries et pour convertir des tensions alternatives en tensions continues constantes. Les redresseurs demi-onde conduisent le courant uniquement pour une polarité de l'entrée CA, tandis que les circuits à double onde conduisent le courant pour les deux polarités.
10. Les circuits de mise en forme d'onde modifient la forme d'onde d'un signal d'entrée et transmettent la forme d'onde modifiée aux bornes de sortie. Les circuits de coupure suppriment la partie de la forme d'onde d'entrée située au-dessus (ou en dessous) d'un niveau donné. Les circuits de blocage ajoutent ou soustraient une tension continue, de sorte que les pics positifs (ou négatifs) aient une tension spécifiée.
11. Le circuit équivalent à faible signal (incrémental) d'une diode est constitué d'une résistance. La valeur de la résistance dépend du point de fonctionnement (Q indiquer).
12. Les sources CC et les condensateurs de couplage sont remplacés par des courts-circuits dans les circuits CA équivalents à faible signal. Les diodes sont remplacées par leurs résistances dynamiques.

Problèmes

Section 9.1 : Concepts de base des diodes

P9.1. Dessinez le symbole du circuit pour une diode, en étiquetant l'anode et la cathode.

P9.2. Dessinez la caractéristique volt-ampère d'une diode typique et étiquetez les différentes régions. **P9.3.** Décrivez une analogie d'écoulement de fluide pour une diode.

P9.4. Écrivez l'équation de Shockley et définissez tous les termes. **P9.5.**

Calculer les valeurs de V_T pour des températures de 20°C et 150°C.

***P9.6.** Esquissez i contre v à l'échelle pour les circuits représentés dans [Figure P9.6](#) . La panne inversée

Les tensions des diodes Zener sont indiquées. Supposons que les tensions de toutes les diodes, y compris les diodes Zener, sont de 0,6 V lorsque le courant circule dans le sens direct.

*****Indique que les réponses sont contenues dans les fichiers de solutions des étudiants. Voir [Annexe E](#) pour plus d'informations sur l'accès aux solutions étudiantes.

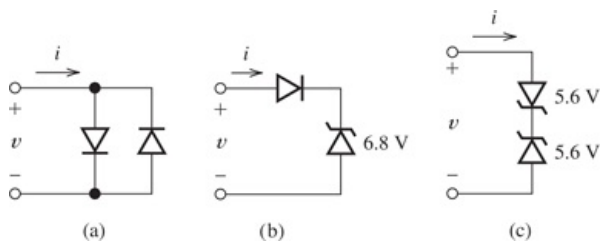


Figure P9.6

P9.7. Répéter [Problème P9.6](#) pour les circuits représentés dans [Figure P9.7](#) .

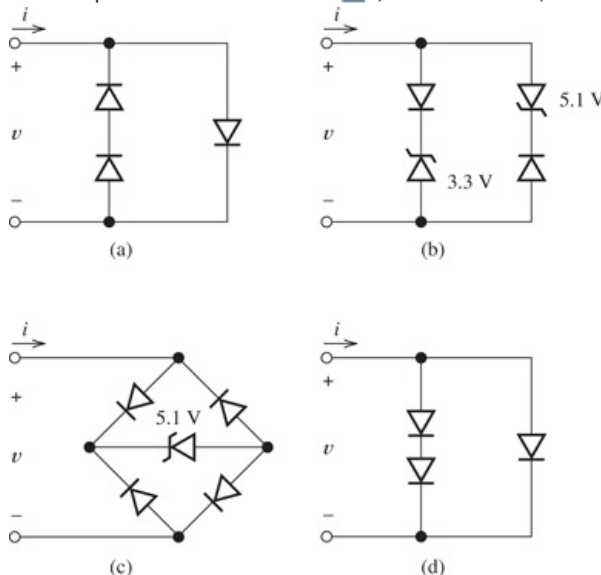


Figure P9.7

***P9.8.** Une diode fonctionne en polarisation directe et est décrite par [Équation 9.4](#) , avec $V_T = 0,026$ V.

Pour $v_{D1} = 0,600$ V, le courant est $i_{D1} = 1$ mA. Pour $v_{D2} = 0,680$ V, le courant est $i_{D2} = 10$ mA.

Déterminer les valeurs de j et n .

P9.9. Avec un courant constant circulant dans le sens direct dans une diode au silicium à faible signal, la tension aux bornes de la diode diminue avec la température d'environ 2 mV/K. Une telle diode a une tension

de 0,650 V, avec un courant de 1 mA à une température de 25°C. Trouvez la tension de la diode à 1 mA et une température de 175°C.

P9.10. Nous avons une diode de jonction qui a $j_{eD} = 0,2 \text{ mA}$ pour $v_D = 0,6 \text{ V}$. Supposons que $n = 2$ et $V_T = 0,026 \text{ V}$. Utilisez l'équation de Shockley pour calculer le courant de diode à $v_D = 0,65 \text{ V}$ et à $v_D = 0,70 \text{ V}$.

P9.11. Nous avons une diode avec $n = 1$, $j_{eD} = 10^{-14} \text{ A}$, et $V_T = 26 \text{ mV}$.

- À l'aide d'un programme informatique de votre choix, obtenez un tracé de j_{eD} contre v_D pour j_{eD} allant de $10 \mu\text{A}$ à 10 mA . Choisissez une échelle logarithmique pour j_{eD} et une échelle linéaire pour v_D . Quel type de courbe en résulte ?
- Placez un $100\text{-}\Omega$ résistance en série avec la diode et tracez le courant en fonction de la tension à travers la combinaison série sur les mêmes axes que ceux utilisés pour la partie (a). Comparez les deux courbes. Quand la résistance série ajoutée est-elle significative ?

P9.12. Une diode au silicium décrite par l'équation de Shockley a $n = 2$ et fonctionne à 150°C avec un courant de 1 mA et une tension de 0,25 V. Déterminez le courant après que la tension ait été augmentée à 0,30 V.

***P9.13.** Les diodes représentées dans [Figure P9.13](#) sont identiques et ont $n = 1$. La température de la diodes est constante à 300 K. Avant que l'interrupteur ne soit fermé, la tension est de 600 mV. Trouvez v après la fermeture de l'interrupteur. Répétez l'opération pour $n = 2$.

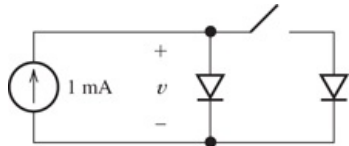


Figure P9.13

P9.14. Supposons que nous ayons une diode de jonction fonctionnant à une température constante de 300 K. Avec un courant direct de 1 mA, la tension est de 600 mV. De plus, avec un courant de 10 mA, la tension est de 700 mV. Trouvez la valeur de n pour cette diode.

***P9.15. Accaparement du courant.** Les diodes représentées dans [Figure P9.15](#) sont identiques et ont $n = 1$. Pour chaque diode, un courant direct de 100 mA produit une tension de 700 mV à une température de 300 K.

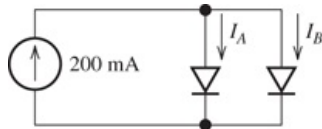



Figure P9.15

- Si les deux diodes sont à 300 K, quelles sont les valeurs de j_{eU} et j_{eB} ?
- Si la diode U est à 300 K et la diode B est à 305 K, retrouvez à nouveau j_{eU} et j_{eB} , étant donné que j_{eD} a une valeur double pour une augmentation de température de 5 000. [Indice: Répondez à la partie (a) en utilisant la symétrie. Pour la partie (b), une équation transcendante pour la tension aux bornes des diodes peut être trouvée. Résolvez par essais et erreurs. Une observation importante à tirer de ce problème est que, à partir de la même température, les diodes devraient théoriquement chacune conduire la moitié du courant total. Cependant, si une diode conduit un peu plus, elle devient plus chaude, ce qui entraîne encore plus de courant. Finalement, l'une des diodes « accapare » la majeure partie du courant. Cela est particulièrement visible pour les appareils qui sont isolés thermiquement les uns des autres avec des courants importants, pour lesquels un échauffement important se produit.]

***P9.16.** L'élément de circuit non linéaire représenté dans [Figure P9.16](#)  $aje_x = \exp(v_x) - 1/10$.

Nous avons également $V_m = 3$ V et $R_m = 1\ \Omega$. Utiliser des techniques de lignes de charge graphiques pour résoudre le problème j_{e_x} et v_x . (Vous préférez peut-être utiliser un programme informatique pour tracer la caractéristique et la ligne de charge.)

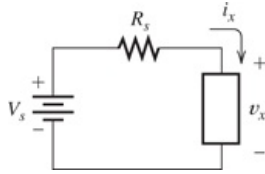






Figure P9.16


P9.17. Répéter [Problème P9.16](#)  pour $V_m = 20$ V, $R_m = 5\text{ k}\Omega$, et $j_{e_x} = 0,01/1 - v_x/5\text{ mA}$.

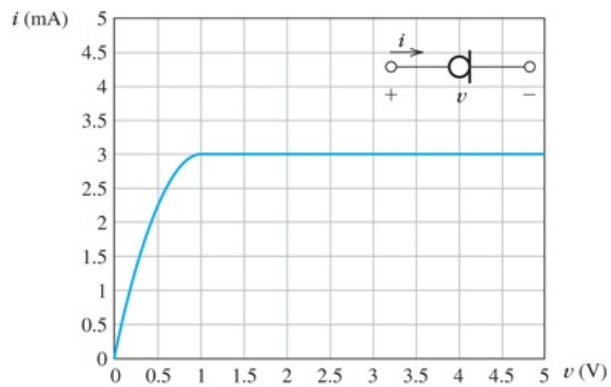
P9.18. Répéter [Problème P9.16](#)  pour $V_m = 6$ V, $R_m = 3\ \Omega$, et $j_{e_x} = v_x/8$.

P9.19. Répéter [Problème P9.16](#)  pour $V_m = 3$ V, $R_m = 1\ \Omega$, et $j_{e_x} = v_x + v_x^2$.

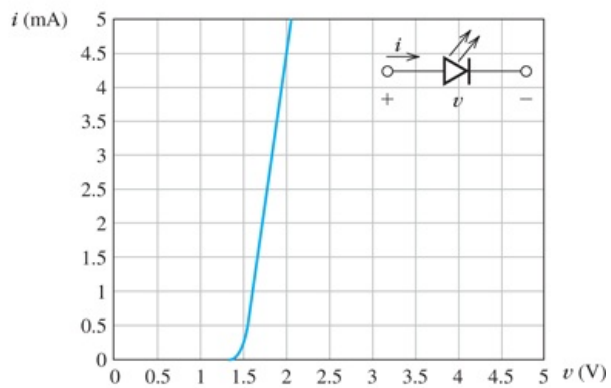
P9.20. Il existe plusieurs types de diodes à usage spécifique. L'une d'entre elles est la diode à courant constant pour laquelle le courant est constant sur une large plage de tension. Le symbole du circuit et la caractéristique volt-ampère d'une diode à courant constant sont indiqués dans [Figure P9.20\(a\)](#) .

Un autre type spécial est la diode électroluminescente (DEL) pour laquelle le symbole du circuit et une caractéristique volt-ampère typique sont représentés dans [Figure P9.20\(b\)](#) . Parfois, la combinaison en série de ces deux appareils est utilisée pour fournir un courant constant à la LED à partir d'une tension variable indiquée dans [Figure P9.20\(c\)](#) .

b. Esquissez la caractéristique volt-ampère globale à l'échelle pour la combinaison parallèle illustrée dans [Figure P9.20\(d\)](#) .



(a) Volt-ampere characteristic of a constant-current diode



(b) Volt-ampere characteristic of a light-emitting diode (LED).

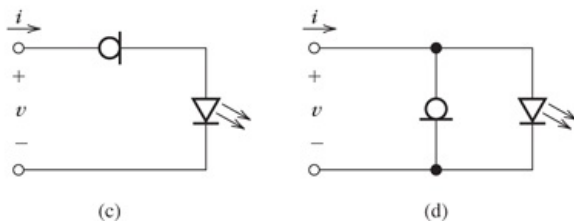


Figure P9.20

P9.21. Déterminer les valeurs pour j et v pour le circuit de Figure P9.21 ayant . La diode est la LED la caractéristique montrée dans Figure P9.20(b) .

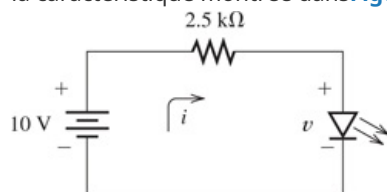


Figure P9.21

P9.22. Déterminer les valeurs pour j_1 et j_2 pour le circuit de Figure P9.22 diode . L'appareil est le courant constant ayant la caractéristique indiquée dans Figure P9.20(a) .

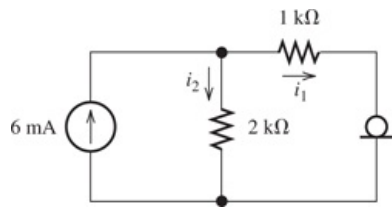


Figure P9.22

P9.23. Déterminer les valeurs pour i et v pour le circuit de [Figure P9.23](#) ayant [Figure P9.20\(b\)](#). La diode est la LED la caractéristique montrée dans [Figure P9.20\(b\)](#).

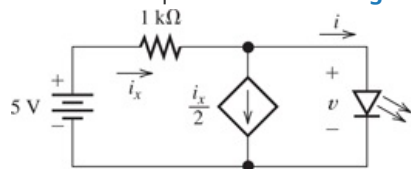


Figure P9.23

P9.24. Répéter [Problème P9.23](#) pour le circuit de [Figure P9.24](#).

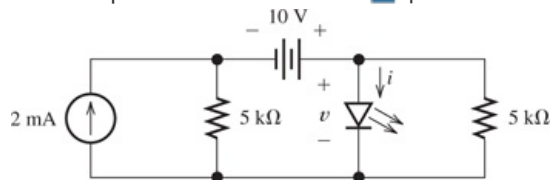



Figure P9.24

Section 9.3 : Circuits régulateurs de tension à diode Zener

P9.25. Qu'est-ce qu'une diode Zener ? À quoi sert-elle généralement ? Dessinez la caractéristique volt-ampère d'une diode Zener idéale de 5,8 V.

***P9.26.** Dessinez le schéma électrique d'un régulateur de tension simple. **P9.27.**

Considérez le régulateur à diode Zener illustré dans **Figure 9.14** résistance de  sur la page 470. Quel est le charge minimale pour laquelle v_o est-ce que 10 V ?

P9.28. Considérez le régulateur de tension illustré dans **Figure P9.28** . La tension source V_m varie de 10 à 14 V et le courant de charge i_L varie de 50 à 100 mA. Supposons que la diode Zener soit idéale. Déterminez la plus grande valeur autorisée pour la résistance R_m de sorte que la tension de charge v_L reste constante avec les variations du courant de charge et de la tension de la source. Déterminer la dissipation de puissance maximale dans R_m .

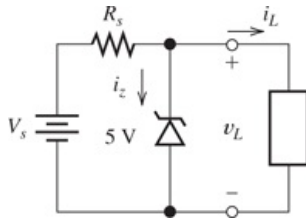


Figure P9.28

P9.29. Concevez un circuit régulateur de tension pour fournir une tension constante de 5 V à une charge à partir d'une tension d'alimentation variable. Le courant de charge varie de 0 à 100 mA et la tension source varie de 8 à 10 V. Vous pouvez supposer que des diodes Zener idéales sont disponibles. Des résistances de n'importe quelle valeur peuvent être spécifiées. Dessinez le schéma de circuit de votre régulateur et spécifiez la valeur de chaque composant. Trouvez également la puissance dissipée dans le pire des cas (maximum) dans chaque composant de votre régulateur. Essayez de faire preuve de bon sens dans votre conception.

P9.30. Répétez **Problème P9.29**  si la tension d'alimentation varie de 6 à 10 V. si

P9.31. Répétez **Problème P9.29**  le courant de charge varie de 0 à 1 A.

P9.32. Décrivez une méthode permettant de résoudre un circuit contenant un seul élément non linéaire ainsi que des résistances, des sources de tension continue et des sources de courant continu, étant donné la caractéristique volt-ampère du dispositif non linéaire.

***P9.33.** Un certain circuit linéaire à deux bornes a des bornes a et b . Dans des conditions de circuit ouvert, nous avons $v_{ab} = 10$ V. Un court-circuit est connecté entre les bornes et un courant de 2 A circule depuis a à b à travers le court-circuit. Déterminer la valeur de v_{ab} lorsqu'un élément non linéaire qui a $i = 3v$ est connecté à travers les terminaux.

Section 9.4 : Modèle de diode idéale

P9.34. Qu'est-ce qu'une diode idéale ? Dessinez sa caractéristique volt-ampère. Après avoir résolu un circuit avec des diodes idéales, quelle vérification est nécessaire pour les diodes initialement supposées allumées ? Éteintes ?

P9.35. Deux diodes idéales sont placées en série, pointant dans des directions opposées. Quel est le circuit équivalent pour la combinaison ? Quel est le circuit équivalent si les diodes sont en parallèle et pointent dans des directions opposées ?

P9.36. Trouver les valeurs de i et v pour les circuits de **Figure P9.36** , en supposant que les diodes sont idéal.

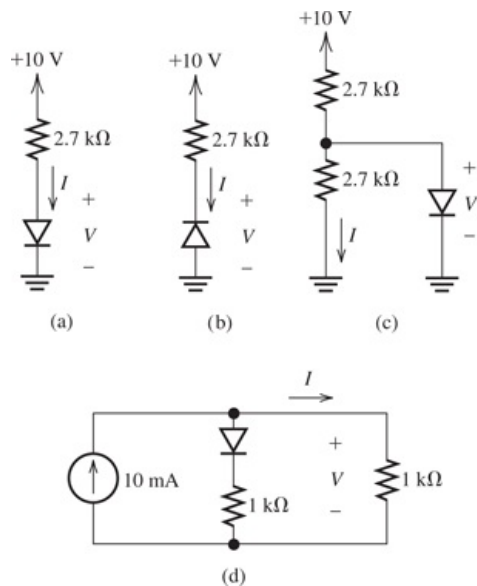


Figure P9.36

***P9.37.** Trouver les valeurs de i et V pour les circuits de Figure P9.37, en supposant que les diodes sont idéal.

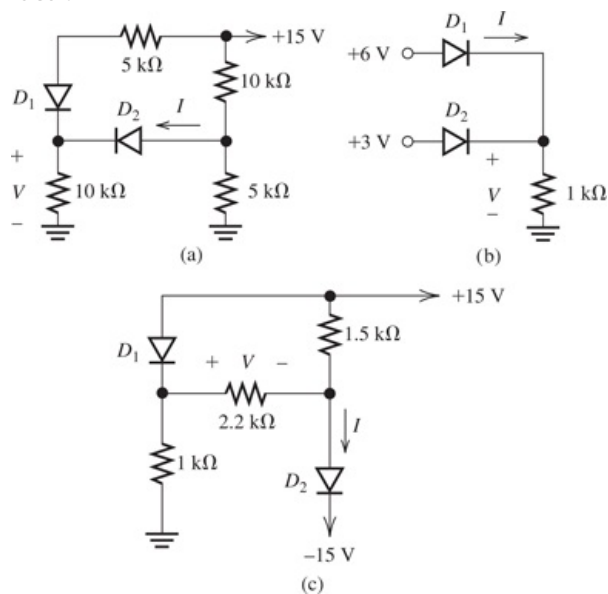


Figure P9.37

P9.38. Trouver les valeurs de i et V pour les circuits de Figure P9.38, en supposant que les diodes sont idéal. Pour la partie (b), considérez $V_{\text{dans}} = 0, 2, 6, \text{ et } 10 \text{ V}$. De plus, pour la partie (b) de la figure, tracez V contre V_{dans} pour V_{dans} allant de -10 V jusqu'à 10 V .

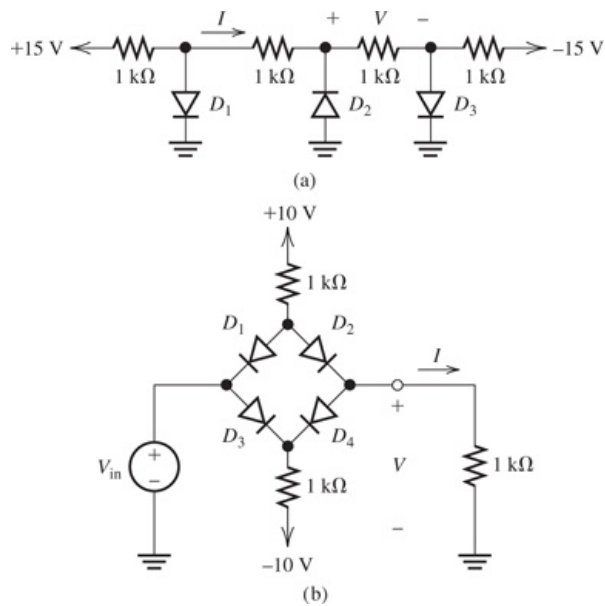


Figure P9.38

P9.39. Esquisser je contre à l'échelle pour chacun des circuits représentés dans Figure P9.39. Supposons que les diodes sont idéales et permettent allant de -10 V à $+10\text{ V}$.

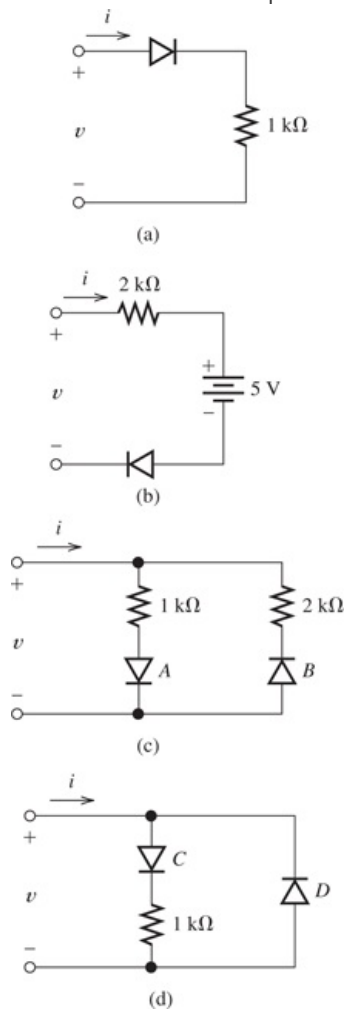


Figure P9.39

P9.40.

- a. Le circuit représenté dans **Figure P9.40(a)** est un type de porte logique. Supposons que les diodes soient idéal. Les tensions V_A et V_B ont indépendamment des valeurs de 0 V (pour la logique 0 ou basse) ou de 5 V (pour la logique 1 ou haute). Pour laquelle des quatre combinaisons de tensions d'entrée la sortie est-elle haute (c'est-à-dire, $V_o = 5$ V) ? De quel type de porte logique s'agit-il ?

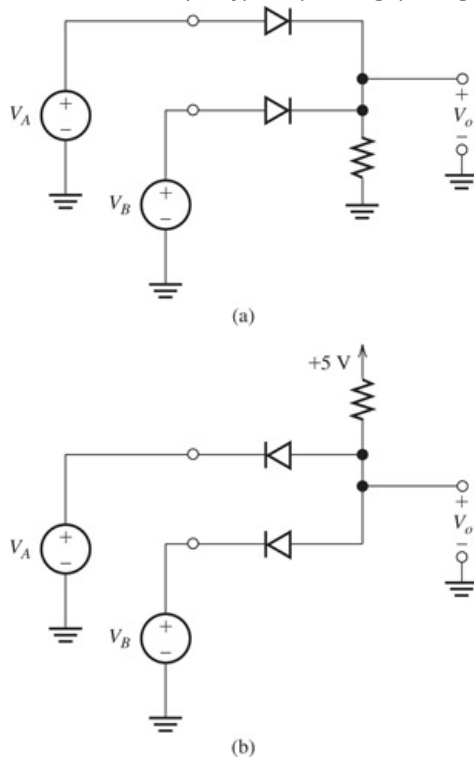


Figure P9.40

- b. Répétez l'opération pour le circuit de **Figure P9.40(b)**.

P9.41. Esquisser $v_o(t)$ à l'échelle en fonction du temps pour le circuit illustré dans **Figure P9.41** les diodes sont idéales.

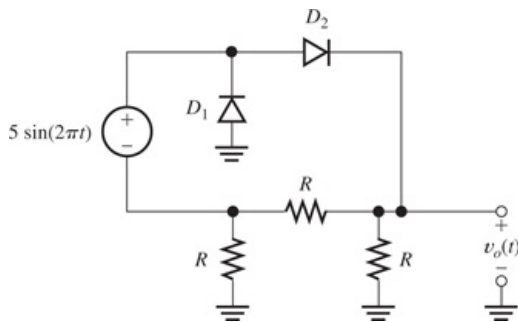


Figure P9.41

Section 9.5 : Modèles de diodes linéaires par morceaux


P9.42. Si un dispositif non linéaire à deux bornes est modélisé par l'approche linéaire par morceaux, quel est le circuit équivalent du dispositif pour chaque segment linéaire ?




P9.43. Une résistance R_{un} est en série avec une source de tension V_{un} . Dessinez le circuit. Indiquez la tension aux bornes de la combinaison comme suit : v et le courant comme j . Dessinez et étiquetez la caractéristique volt-ampère (j contre v).

P9.44. La caractéristique volt-ampère d'un certain dispositif à deux bornes est une ligne droite qui passe par les points (2 V, 5 mA) et (3 V, 15 mA). La référence de courant pointe vers le positif

référence pour la tension. Déterminer le circuit équivalent pour cet appareil.

P9.45. Considérez la caractéristique volt-ampère d'une diode Zener idéale de 10 V illustrée dans [Figure 9.14](#)

 sur la page 470. Déterminer le circuit équivalent linéaire par morceaux pour chaque segment de la caractéristique.

***P9.46.** Supposons que nous ayons approximé une caractéristique volt-ampère non linéaire par les segments de droite représentés dans [Figure P9.46\(c\)](#) . Trouvez le circuit équivalent pour chaque segment. Utilisez les circuits équivalents à trouver dans les circuits représentés dans [Figure P9.46\(a\)](#)  et (b) .

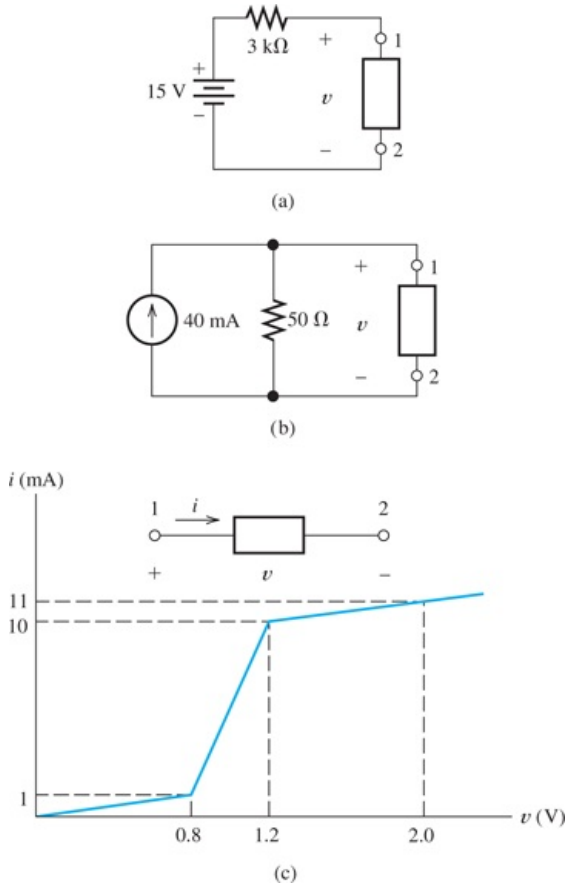




Figure P9.46

***P9.47.** La diode Zener illustrée dans [Figure P9.47](#)  a un modèle linéaire par morceaux montré dans [Chiffre 9.19](#)  sur la page 473. Tracer la tension de charge v_L par rapport au courant de charge i_L pour i_L allant de 0 à 100 mA.

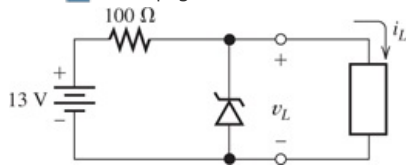




Figure P9.47

P9.48. La diode représentée dans [Figure](#)  peut être représenté par le modèle de [Figure 9.23](#)  sur [P9.48](#) page 475, avec $V_f \approx 0,7$ V.

- Supposons que la diode fonctionne comme un circuit ouvert et résolvons les tensions des nœuds v_1 et v_2 . Les résultats sont-ils cohérents avec le modèle ? Pourquoi ou pourquoi pas ?
- Répétez la partie (a), en supposant que la diode fonctionne comme une source de tension de 0,7 V.

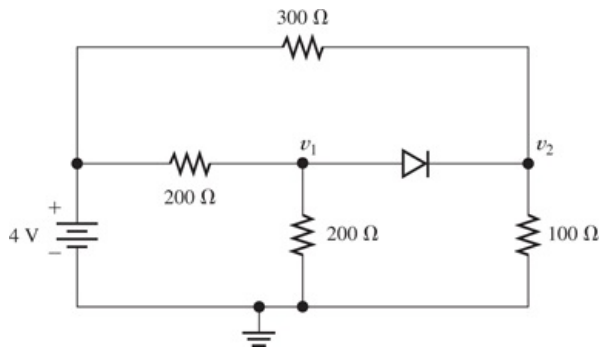




Figure P9.48

Section 9.6 : Circuits redresseurs

P9.49. Dessinez le schéma électrique d'un redresseur demi-onde permettant de produire une tension continue presque stable à partir d'une source alternative. Dessinez deux circuits à double alternance différents.

P9.50. Une source CA de 20 V-rms 60 Hz est en série avec une diode idéale et une 100-Ω Résistance. Déterminer le courant de crête et le PIV de la diode.

P9.51. Considérez le circuit de charge de la batterie illustré dans [Figure 9.25](#)  sur la page 476. La source de courant alternatif a une valeur de crête de 24 V et une fréquence de 60 Hz. La résistance est 2 Ω, la diode est idéale, et $V_B = 12$ V. Déterminer le courant moyen (c'est-à-dire la valeur de la charge qui traverse la batterie en 1 seconde). Supposons que la batterie démarre à partir d'un état totalement déchargé et qu'elle ait une capacité de 100 ampères-heures. Combien de temps faut-il pour charger complètement la batterie ?

P9.52. Considérez le redresseur demi-onde illustré dans [Figure 9.26](#)  sur la page 477. La source CA a une valeur efficace de 20 V et une fréquence de 60 Hz. Les diodes sont idéales et la capacité est très grande, donc la tension d'ondulation V_{est} est très petite. La charge est une 100-Ω Résistance. Déterminez le PIV à travers la diode et la charge qui traverse la diode par cycle.

P9.53. La plupart des voltmètres CC produisent une lecture égale à la valeur moyenne de la tension mesurée. La définition mathématique de la valeur moyenne d'une forme d'onde périodique est


$$V_{\text{moyenne}} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$$


dans lequel T est la période de la tension $v(t)$ appliqué au compteur.

- Que lit un voltmètre CC si la tension appliquée est $v(t) = V_m \sin(\omega t)$?
- Quelle est la valeur affichée par le compteur si la tension appliquée est une version redressée demi-onde de l'onde sinusoïdale ?
- Quelle est la valeur affichée par le compteur si la tension appliquée est une version redressée à onde complète de l'onde sinusoïdale ?


***P9.54.** Concevez une alimentation électrique à redresseur demi-onde pour fournir une tension moyenne de 9 V avec une ondulation crête à crête de 2 V à une charge. Le courant de charge moyen est de 100 mA. Supposons que des diodes idéales et des sources de tension alternative de 60 Hz de toutes les amplitudes nécessaires sont disponibles. Dessinez le schéma de circuit de votre conception. Spécifiez les valeurs de tous les composants utilisés.

P9.55. Répéter [Problème P9.54](#)  avec un pont redresseur à double alternance.

P9.56. Répéter [Problème P9.54](#)  avec deux diodes et des sources de tension déphasées pour former un redresseur d'onde.

P9.57. Répéter [Problème P9.54](#) , en supposant que les diodes ont des chutes de tension directe de 0,8 V.

***P9.58.** Un redresseur demi-onde est nécessaire pour fournir 15 V CC à une charge qui consomme un courant moyen de 250 mA. L'ondulation crête à crête doit être de 0,2 V ou moins. Quelle est la valeur minimale autorisée pour la capacité de lissage ? Un redresseur à double onde est-il nécessaire ?

P9.59. Considérez le circuit de charge de batterie illustré dans [Figure 9.25](#)  sur la page 476, dans lequel $v_m(t) = 20 \sin(200\pi t)$, $R = 80 \Omega$, $V_B = 12$ V, et la diode est idéale.

- Esquisser le courant $i(t)$ à l'échelle en fonction du temps.
- Déterminez le courant de charge moyen de la batterie.

[Indice: Le courant moyen est la charge qui circule dans la batterie en un cycle, divisée par la période.]

P9.60.

- Considérez le redresseur à double alternance illustré dans [Figure 9.27](#) sur la page 478, avec un grand lissage capacité placée en parallèle avec la charge R et $V_m = 12$ V. En supposant que les diodes soient idéales, quelle est la valeur approximative de la tension de charge ? Quel PIV apparaît aux bornes des diodes ?
- Répétez l'opération pour le pont à onde complète illustré dans [Figure 9.28](#) sur la page 479.

P9.61. [Figure P9.61](#) montre le circuit équivalent pour une charge de batterie automobile typique système. La source triphasée connectée en triangle représente les bobines du stator de l'alternateur. (Les sources de courant alternatif triphasées sont décrites dans [Section 5.7](#) En fait, le stator de l'alternateur est généralement (connecté en étoile, mais les tensions aux bornes sont les mêmes que pour le triangle équivalent.) Non représenté sur la figure, un régulateur de tension qui contrôle le courant appliqué à la bobine du rotor de l'alternateur et, par conséquent, V_m et le courant de charge de la batterie.

- Esquisser la tension de charge $v_L(t)$ à l'échelle en fonction du temps. Supposons des diodes idéales et que V_m est suffisamment grand pour que le courant circule dans la batterie à tout moment. [Indice: Chaque source et quatre des diodes forment un pont redresseur à double alternance.]
- Déterminer l'ondulation crête à crête et la tension de charge moyenne en termes de V_m .
- Déterminer la valeur de V_m nécessaire pour fournir un courant de charge moyen de 30 A.
- Quels facteurs supplémentaires devraient être pris en compte dans un calcul réaliste de V_m ?

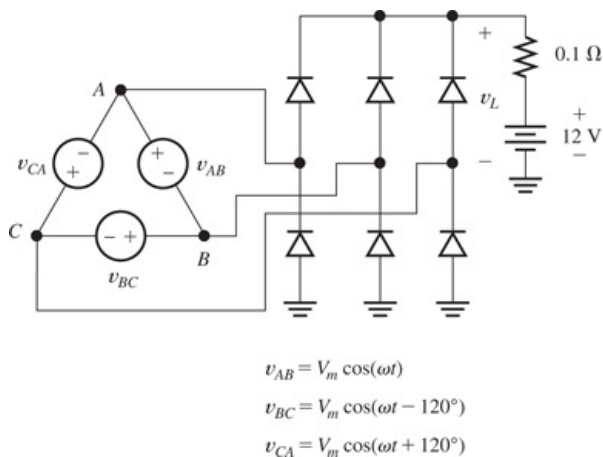


Figure P9.61

Modèle idéalisé d'un système de charge de batterie automobile.

Section 9.7 : Circuits de mise en forme d'ondes

P9.62. Qu'est-ce qu'un circuit clipper ? Dessinez un exemple de schéma de circuit, y compris les valeurs des composants, une forme d'onde d'entrée et la forme d'onde de sortie correspondante.

P9.63. Croquis pour mettre à l'échelle la forme d'onde de sortie du circuit illustré dans [Figure P9.63](#). Supposons que les diodes soient idéales.

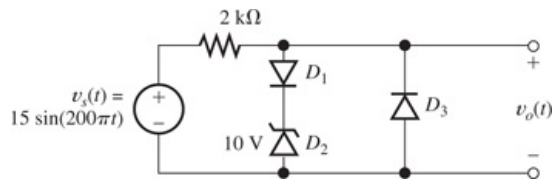


Figure P9.63

P9.64. Esquisser la caractéristique de transfert (v_o contre v_{dans}) à l'échelle du circuit illustré dans [Figure P9.64](#)

Supposons que la diode soit idéale.

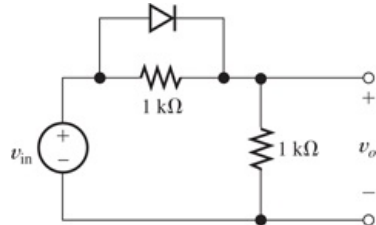


Figure P9.64

P9.65. Esquisser la caractéristique de transfert (v_o contre v_{dans}) à l'échelle du circuit illustré dans [Figure P9.65](#)

Supposons que les diodes soient idéales.

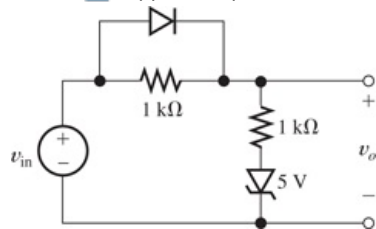


Figure P9.65

P9.66. Esquisser la caractéristique de transfert (v_o contre v_{dans}) à l'échelle du circuit illustré dans [Figure P9.66](#)

Permettre v_{dans} allant de -5 V à $+5$ V et supposons que les diodes sont idéales.

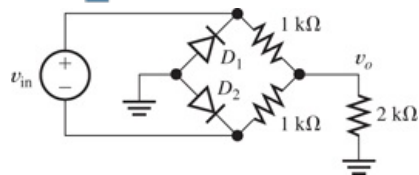


Figure P9.66

P9.67. Esquisser la caractéristique de transfert (v_o contre v_{dans}) pour le circuit montré dans [Figure P9.67](#) , étiqueter soigneusement le point d'arrêt et les pentes. Autoriser v_{dans} allant de -5 V à $+5$ V et supposons que les diodes sont idéales.

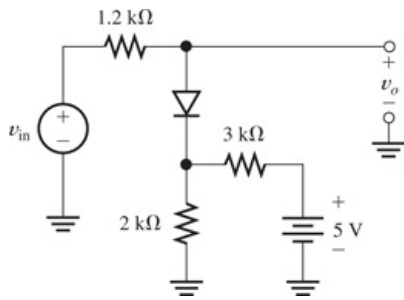


Figure P9.67

P9.68. Qu'est-ce qu'un circuit de serrage ? Dessinez un exemple de schéma de circuit, y compris les valeurs des composants, une forme d'onde d'entrée et la forme d'onde de sortie correspondante.

P9.69. Considérez le circuit illustré dans [Figure P9.69](#), dans lequel le RC la constante de temps est très longue par rapport à la période de l'entrée et dans laquelle la diode est idéale. $v_o(t)$ à l'échelle en fonction du temps.

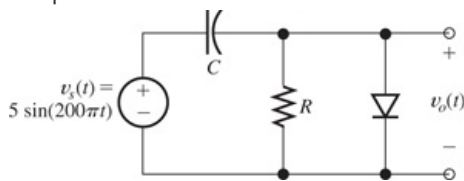


Figure P9.69

***P9.70.** Croquis pour mettre à l'échelle la forme d'onde de sortie à l'état stable pour le circuit illustré dans [Figure P9.70](#). Supposons que RC est beaucoup plus grande que la période de la tension d'entrée et que les diodes sont idéales.

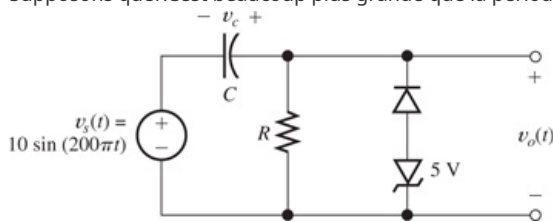


Figure P9.70

P9.71. Circuit doubleur de tension. Considérez le circuit de [Figure P9.71](#). Les condensateurs sont très grande, donc ils ne déchargent qu'une très petite quantité par cycle. (Ainsi, aucune tension alternative n'apparaît à travers les condensateurs, et l'entrée alternative plus la tension continue de C_1 doit apparaître au point UN .) Esquissez la tension au point UN en fonction du temps. Trouvez la tension aux bornes de la charge. Pourquoi appelle-t-on cela un doubleur de tension ? Quelle est la PIV aux bornes de chaque diode ?

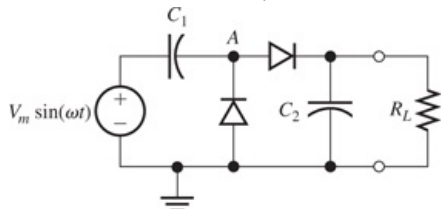




Figure P9.71

***P9.72.** Concevez un circuit de découpage pour couper les parties d'une tension d'entrée qui tombent au-dessus de 3 V ou en dessous - 5 V. Supposons que des diodes ayant une chute de tension directe constante de 0,7 V soient disponibles. Des diodes Zener idéales de toute tension de claquage requise sont disponibles. Des sources de tension continue de toute valeur requise sont disponibles.

P9.73. Répéter **Problème P9.72** , avec des niveaux d'écrtage de +2 V et +5 V (c'est-à-dire, chaque partie de la forme d'onde d'entrée ci-dessous +2 ou supérieur +5 est coupé).

P9.74. Concevez des circuits qui présentent les caractéristiques de transfert indiquées dans **Figure P9.74** . Supposons que v_{in} varie de -10 à $+10$ V. Utilisez des diodes, des diodes Zener et des résistances de toutes les valeurs nécessaires. Supposons une chute de tension directe de 0,6 V pour toutes les diodes et que les diodes Zener ont une caractéristique idéale dans la région de claquage. Les tensions d'alimentation de ± 15 V sont disponibles.

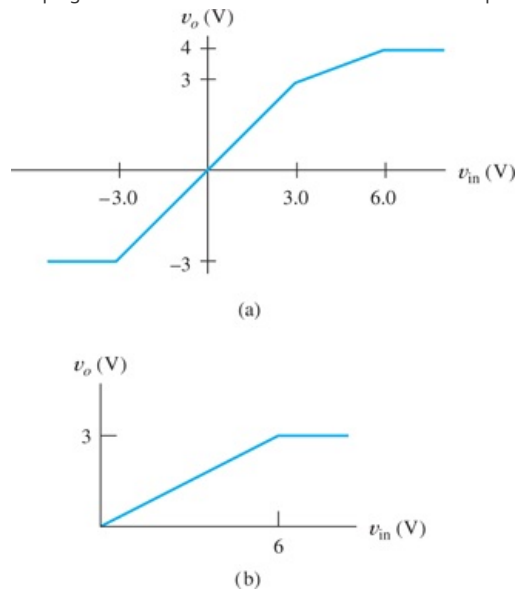



Figure P9.74

***P9.75.** Concevez un circuit de serrage pour fixer l'extrême négatif d'une forme d'onde d'entrée périodique à -5 V. Utilisez des diodes, des diodes Zener et des résistances de toutes les valeurs requises. Supposons une chute de tension directe de 0,6 V pour toutes les diodes et que les diodes Zener ont une caractéristique idéale dans la région de claquage. Les tensions d'alimentation de ± 15 V sont disponibles. **P9.76.** Répéter **Problème P9.75**

 pour une tension de serrage de +5 V.

Section 9.8 : Circuits équivalents linéaires à faible signal

P9.77. Une certaine diode a $i_{EDQ} = 4 \text{ mA}$ et $i_{ED}(t) = 0,5 \cos(200\pi t) \text{ mA}$. Trouver une expression pour $i_{ED}(t)$, et dessinez-le à l'échelle en fonction du temps.

P9.78. De quoi est constitué le circuit équivalent à faible signal d'une diode ? Comment est déterminée la résistance dynamique d'un élément de circuit non linéaire à un point de fonctionnement donné ?

P9.79. Par quoi remplace-t-on les sources de tension continue dans un circuit équivalent à faible signal alternatif ? Pourquoi ?

P9.80. Par quoi remplacer une source de courant continu dans un circuit équivalent à un courant alternatif à faible signal ? Justifiez votre réponse.

***P9.81.** Un certain dispositif non linéaire a $i_{ED} = v_D^3 / 8$. Esquisser i_{ED} contre v_D à l'échelle pour v_D allant de -2 V à $+2 \text{ V}$. Cet appareil est-il une diode ? Déterminez la résistance dynamique de l'appareil et faites un croquis en fonction de v_D à l'échelle pour v_D allant de -2 V à $+2 \text{ V}$. **P9.82.** Une diode de claquage a

$$i_{ED} = -\frac{10^{-6}}{1 + v_D/5} \quad \text{pour } -5 \text{ V} < v_D < 0$$

où i_{ED} est en ampères. i_{ED} contre v_D dans la région de polarisation inverse. Trouvez la résistance dynamique de cette diode à $i_{EDQ} = -1 \text{ mA}$ et à $i_{EDQ} = -10 \text{ mA}$.

P9.83. Un certain dispositif non linéaire fonctionne avec une tension appliquée donnée par $v_D(t) = 5 + 0,01 \cos(\omega t) \text{ V}$

Le courant est donné par

$$i_{ED}(t) = 3 + 0,2 \cos(\omega t) \text{ mA}$$

Déterminer la résistance dynamique et Q -point de l'appareil dans les conditions données. **P9.84.** Idéalement, nous souhaitons que la tension d'une diode Zener soit constante dans la zone de claquage. Qu'est-ce que cela implique sur la résistance dynamique dans la zone de claquage d'une diode Zener idéale ?

***P9.85.** Considérez le circuit régulateur de tension illustré dans [Figure P9.85](#). La tension d'ondulation CA est de 1 V crête à crête. La tension de charge continue (moyenne) est de 5 V . Quelle est la Q -point de courant dans la diode Zener ? Quelle est la résistance dynamique maximale autorisée pour la diode Zener si l'ondulation de sortie doit être inférieure à 10 mV crête à crête ?

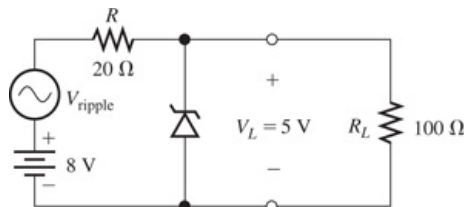


Figure P9.85

Test pratique

Voici un test pratique que vous pouvez utiliser pour vérifier votre compréhension des concepts les plus importants de ce chapitre. Les réponses se trouvent dans [Annexe D](#) et des solutions complètes sont incluses dans l'étudiant Fichiers de solutions. Voir [Annexe E](#) pour plus d'informations sur les solutions étudiantes.

T9.1. Déterminer la valeur de j_D pour chacun des circuits représentés dans [Figure T9.1](#). La caractéristique car la diode est montrée dans [Figure 9.8](#) sur la page 465.

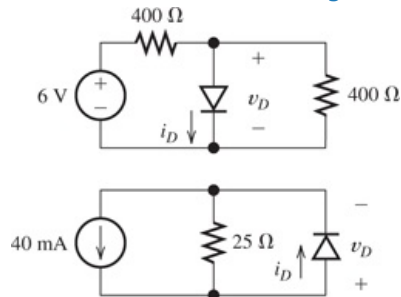


Figure T9.1

T9.2. La diode représentée dans [Figure T9.2](#) est idéale. Déterminer l'état de la diode et les valeurs de v_x et j_x .

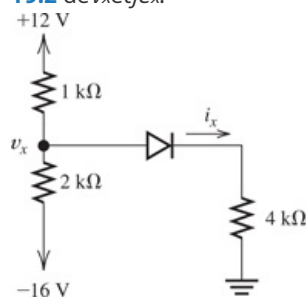


Figure T9.2

T9.3. La caractéristique courant/tension d'un dispositif à deux bornes passe par les points (5 V, 2 mA) et (10 V, 7 mA). La référence pour le courant pointe vers la référence positive pour la tension. Déterminez les valeurs de la résistance et de la source de tension pour le circuit équivalent linéaire par morceaux pour ce dispositif entre les deux points donnés.

T9.4. Dessinez le schéma du circuit d'un pont redresseur à double alternance avec une résistance comme charge. **T9.5.** Supposons que nous ayons une source de tension sinusoïdale de 10 V de crête. Dessinez le schéma d'un circuit qui coupe la partie de la sinusoïde au-dessus de 5 V et en dessous de -4 V. Le circuit doit être composé de diodes idéales, de sources de tension continue et d'autres composants selon les besoins. Assurez-vous d'étiqueter les bornes sur lesquelles passe la forme d'onde de sortie coupée. $v_o(t)$ apparaît.

T9.6. Supposons que nous ayons une source de tension sinusoïdale de 10 Hz, $v_i(t)$. Dessinez le schéma d'un circuit qui fixe les pics positifs à -4 V. Le circuit doit être composé de diodes idéales, de sources de tension continue et d'autres composants selon les besoins. Énumérez toutes les contraintes à respecter lors de la sélection des valeurs des composants. Assurez-vous d'étiqueter les bornes sur lesquelles passe la forme d'onde de sortie bloquée. $v_o(t)$ apparaît.

T9.7. Supposons que nous ayons une diode au silicium fonctionnant avec un courant de polarisation de 5 mA à une température de 300 K. Le courant de la diode est donné par l'équation de Shockley avec $n=2$. Dessinez le circuit équivalent à faible signal pour la diode, y compris les valeurs numériques des composants.

