

2 Circuits à diodes

2.1 Description d'une jonction semi-conductrice

On sait que l'atome de silicium possède quatre électrons de valence sur sa couche périphérique. Comme ceux-ci ne sont pas libres de circuler, le silicium, contrairement au cuivre, n'est pas conducteur à très basse température. On peut cependant modifier sa conductivité en y apportant une très faible quantité d'atomes accepteurs d'électrons (Bore avec trois électrons périphériques) ou d'atomes donneurs d'électrons (Arsenic avec cinq électrons périphériques). Ce faisant, on crée un matériau semi-conducteur.

Les diodes sont réalisées par la juxtaposition de deux types de semi-conducteurs sur la structure d'un cristal de silicium extrêmement pur (figure 2.1). En injectant d'un côté du cristal des atomes accepteurs d'électrons et de l'autre des atomes donneurs d'électrons, on réalise une jonction semi-conductrice possédant d'une part des porteurs de charge positifs (semi-conducteur de type **p**) et d'autre part des porteurs de charge négatifs (semi-conducteur de type **n**).

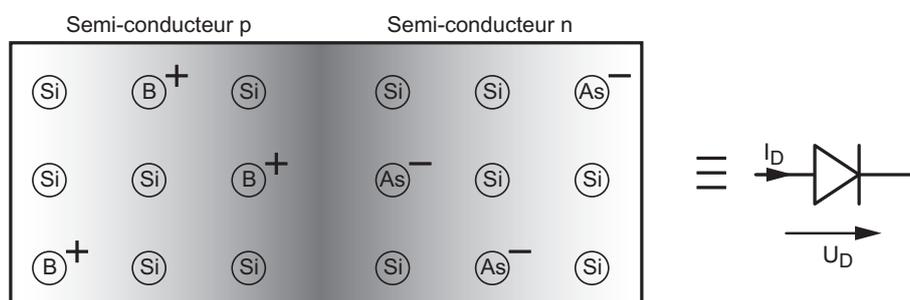


FIG. 2.1: Jonction semi-conductrice

Ces porteurs de charge peuvent être considérés comme des charges libres de se déplacer dans le cristal de silicium. La variation locale de densité, appelée gradient des charges, fait que celles-ci auront naturellement tendance à se déplacer vers la zone de densité moindre : c'est le phénomène de diffusion. Cependant, en se déplaçant, ces charges négatives et positives créent un champ électrique qui arrête leur progression. À ce champ électrique correspond une différence de tension que l'on désigne sous le nom de barrière de potentiel.

On peut agir sur cette barrière de potentiel en appliquant une tension extérieure. Si un potentiel négatif est appliqué du côté **n**, on abaisse la barrière de potentiel et facilite la circulation des porteurs de charge. Dans le cas contraire, en appliquant un potentiel positif du côté **n**, on renforce la barrière de potentiel et bloque la circulation des porteurs de charge.

La diode est donc un élément semi-conducteur qui laisse facilement circuler le courant dans un sens (polarisation directe) et le bloque complètement ou presque en polarisation inverse. Son symbole est représenté à la figure 2.1.

En physique des semi-conducteurs, on montre que le courant circulant dans une diode est décrit par l'équation suivante

$$I_D = I_S \left(\exp \left(\frac{U_D}{nV_T} \right) - 1 \right) \quad (2.1)$$

dont les paramètres physiques sont :

- V_T , le potentiel thermique équivalent à l'énergie thermique kT des porteurs de charge q

$$V_T = \frac{kT}{q} \simeq 26 \text{ mV} @ T = 300\text{K} \quad (2.2)$$

où k est la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$) et q la charge électrique élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$);

- I_S , le courant de saturation inverse de la jonction (ordre de grandeur : quelques dixièmes de nA);
- n , le facteur technologique dépendant du type de diode et de la manière dont elle est fabriquée ; il est généralement compris entre 1.3 et 2 pour les diodes et vaut pratiquement 1 pour les transistors bipolaires.

La valeur de I_S se mesure en polarisant négativement la diode avec une tension légèrement négative ($\simeq -1 \text{ V}$). L'exponentielle de l'équation (2.1) devient alors négligeable par rapport à 1 et on obtient $I_D \simeq -I_S$. Ce courant inverse est suffisamment petit (de l'ordre du nA) pour qu'on puisse l'admettre nul et considérer que la diode ne conduit pas en polarisation inverse.

2.2 Caractéristique d'une diode

Comme on vient de le voir, la diode en polarisation inverse ne laisse circuler qu'un très faible courant que l'on admet nul :

$$I_D = -I_S \simeq 0 \quad \text{si} \quad U_D < -0.3 \text{ V} \quad (2.3)$$

Si la tension négative devient trop grande, le champ électrique devient si fort qu'il peut arracher des électrons du cristal semi-conducteur et causer par effet d'avalanche le claquage de la jonction et sa destruction. Les tensions de claquage des diodes redresseuses s'élèvent à plusieurs centaines de volts.

En polarisation directe, le courant croît exponentiellement avec la tension. En effet, lorsque la tension appliquée est suffisamment positive ($U_D > 0.3 \text{ V}$), l'exponentielle de l'équation (2.1) est bien supérieure à 1 et il vient

$$I_D = I_S \exp \left(\frac{U_D}{nV_T} \right) \quad \text{si} \quad U_D > +0.3 \text{ V} \quad (2.4)$$

La caractéristique d'une diode semi-conductrice est illustrée par les courbes de la figure 2.2. Afin de bien mettre en évidence la dépendance du courant par rapport à la tension appliquée, des échelles différentes ont été utilisées. On notera en particulier (figure 2.2 c et d) que l'allure de la caractéristique est pratiquement la même pour des courants faibles ou élevés ; seule la tension a changé en passant d'environ 0.6 V pour $I_D = 1 \text{ mA}$ à environ 0.8 V pour $I_D = 100 \text{ mA}$.

2.2 Caractéristique d'une diode

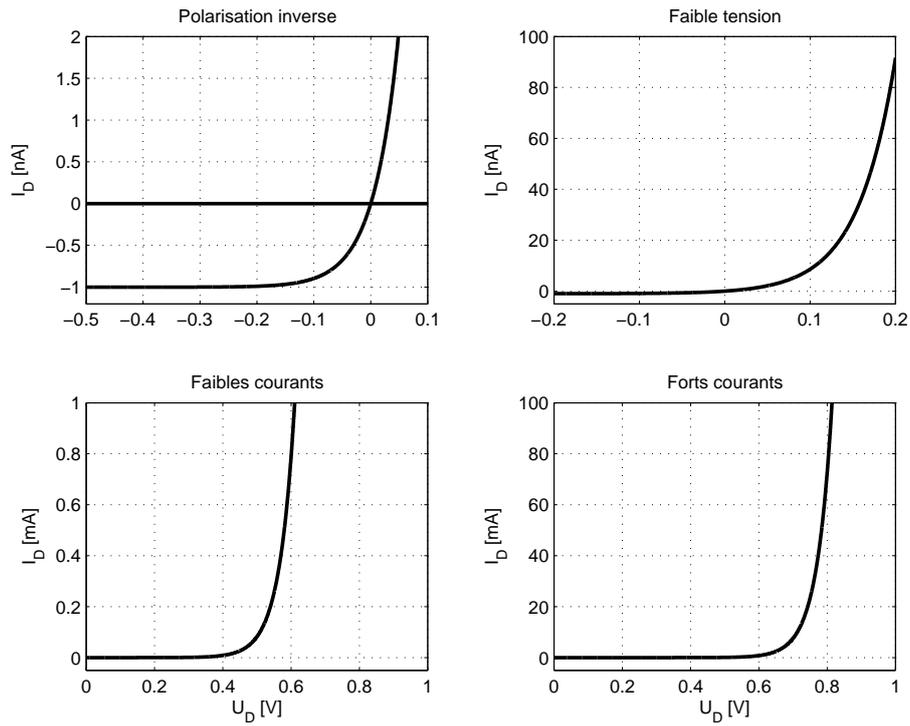


FIG. 2.2: Caractéristiques d'une diode
 a) en polarisation inverse, b) pour de faibles tensions
 c) pour de faibles courants, d) pour de forts courants

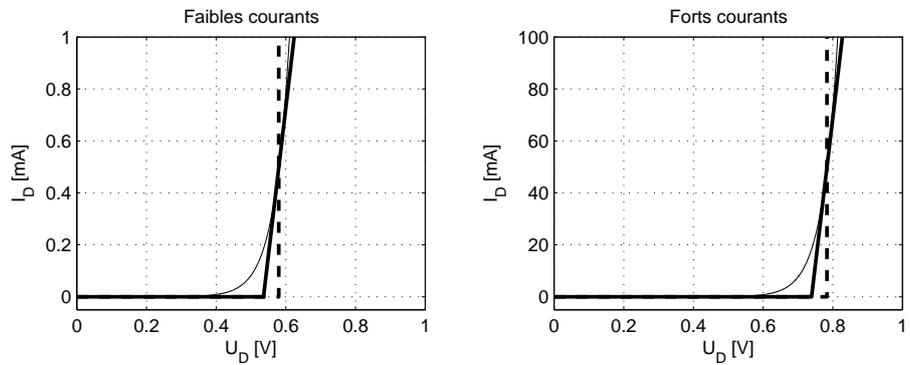


FIG. 2.3: Modélisation par des fonctions d'ordre 0 et d'ordre 1

La connaissance de cette caractéristique non linéaire, fondamentale pour décrire le comportement des diodes, ne nous permet malheureusement pas de résoudre analytiquement un circuit comprenant simplement un générateur, une résistance et une diode (figure 2.4a). Les équations décrivant ce circuit sont en effet non linéaires et ne peuvent pas être résolues analytiquement

$$U_g = R I_D + U_D \quad \text{avec} \quad U_D = n V_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right)$$

Seule la donnée de modèles linéaires approchant aussi bien que possible la caractéristique de la diode permet de calculer le courant circulant dans le circuit.

2.3 Modèles linéaires d'une diode

En observant la caractéristique d'une diode (figure 2.3), on constate que le courant augmente fortement à partir d'un seuil de tension alors que la tension change relativement peu. On a en effet $U_D \simeq 0.6 \text{ V}$ pour $I_D \simeq 1 \text{ mA}$ et $U_D \simeq 0.8 \text{ V}$ pour $I_D \simeq 100 \text{ mA}$. On peut ainsi, dans une première approximation, considérer que cette tension est constante et qu'elle vaut

$$U_D = V_j \simeq 0.7 \text{ V} \quad (2.5)$$

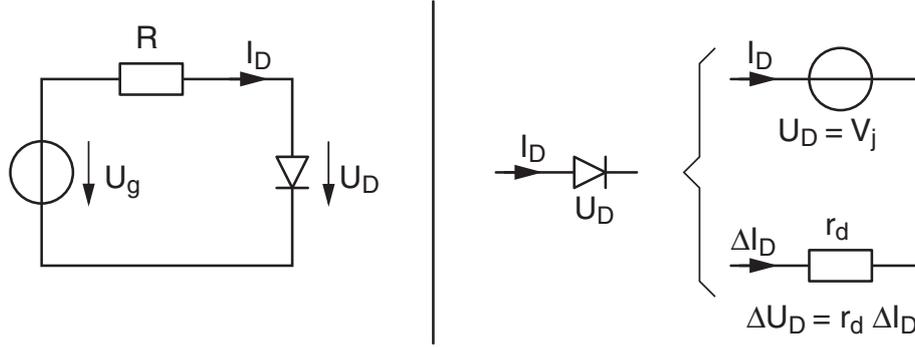


FIG. 2.4: Circuit à diode avec ses modèles d'ordre 0 et d'ordre 1

Avec ce modèle d'ordre 0, la diode est remplacée par une simple source de tension et le courant qui parcourt le circuit de la figure 2.4a vaut

$$I_D = \frac{U_g - V_j}{R} \quad (2.6)$$

Dans le cas où l'on considère de légères variations de la tension U_D appliquée à la diode autour de V_j , on peut améliorer le modèle en tenant compte de la pente de la caractéristique

$$\left. \frac{dI_D}{dU_D} \right|_{U_D=V_j} = \left. \frac{d \left(I_S e^{U_D/(nV_T)} \right)}{dU_D} \right|_{U_D=V_j} = \frac{I_D}{nV_T} \quad (2.7)$$

On constate alors que cette pente est l'inverse d'une résistance différentielle r_d qui relie les variations de la tension U_D à celles du courant I_D

$$r_d \equiv \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} = \frac{nV_T}{I_D} \quad (2.8)$$

Faisant cela, on a remplacé la fonction exponentielle de la diode par une droite tangente au point de fonctionnement que l'on a calculé avec le modèle d'ordre 0. Le modèle ainsi obtenu est dit d'ordre 1 et il permet de décrire la variation de la tension autour de V_j

$$\Delta U_D = r_d \Delta I_D \quad (2.9)$$

2.3.1 Exemple de calcul d'un circuit

Considérons le circuit de la figure 2.4a avec $U_g = 5 \text{ V}$, $R = 100 \Omega$. Le calcul ne peut se faire que sur la base du modèle d'ordre 0 car la résistance différentielle dépend du courant

I_D inconnu. Admettant $V_j = 0.7\text{ V}$, on obtient alors

$$I_D = \frac{U_g - V_j}{R} = \frac{5\text{ V} - 0.7\text{ V}}{100\ \Omega} = 43\text{ mA}$$

Connaissant le point de fonctionnement de la diode et admettant $n = 1.7$, on peut ensuite calculer la résistance différentielle

$$r_d = \frac{nV_T}{I_D} = \frac{1.7 \cdot 26\text{ mV}}{43\text{ mA}} \simeq 1\ \Omega$$

qui, dans le cas présent, est négligeable par rapport à la résistance R du circuit. Le fait que r_d soit très petit par rapport à R permet de justifier a posteriori l'utilisation du modèle d'ordre 0.

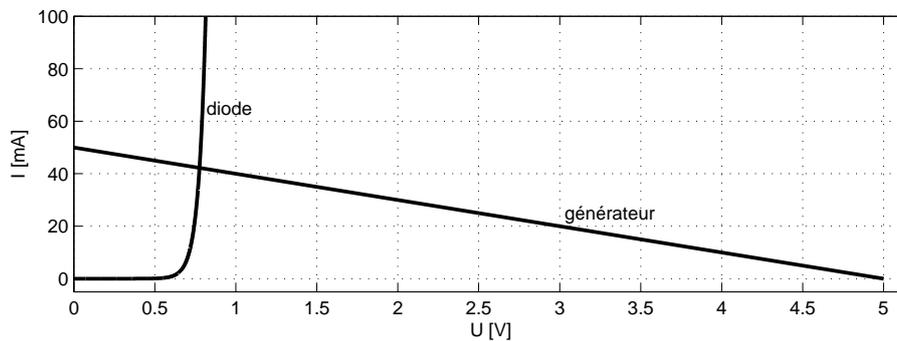


FIG. 2.5: Caractéristiques de la diode et du générateur

Remarque La solution exacte peut être trouvée numériquement en recherchant l'intersection entre la droite de charge du générateur

$$U_D = U_g - R I_D \quad (2.10)$$

et la caractéristique de la diode

$$I_D = I_S \exp\left(\frac{U_D}{nV_T}\right) \quad (2.11)$$

Une illustration en est donnée dans la figure 2.5. On obtient alors

$$U_D = 0.77\text{ V}, \quad I_D = 42\text{ mA}$$

On voit ainsi que, dans le cas présent, l'imprécision causée par le modèle d'ordre 0 est de -9% pour la tension U_D et $+2\%$ pour le courant du circuit.

2.4 Circuits redresseurs

Une application courante de la diode est le redressement de tensions sinusoïdales dans le but de réaliser une conversion AC–DC. Dans la plupart des cas, la tension sinusoïdale à redresser est obtenue en utilisant le réseau électrique $240\text{ V} / 50\text{ Hz}$ et un transformateur servant à abaisser la tension sinusoïdale au niveau désiré.

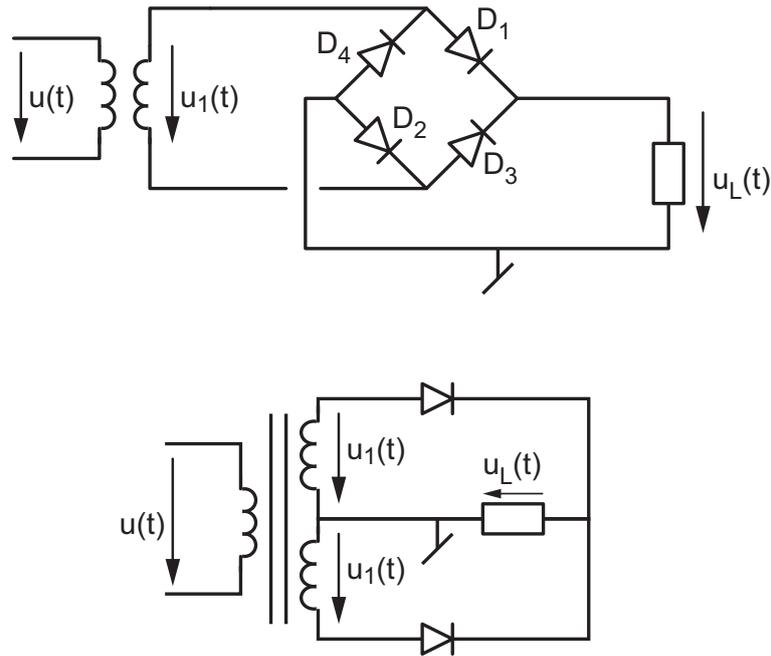


FIG. 2.6: Redresseurs double-alternance avec
 a) un pont de Graetz
 b) un transformateur à point milieu

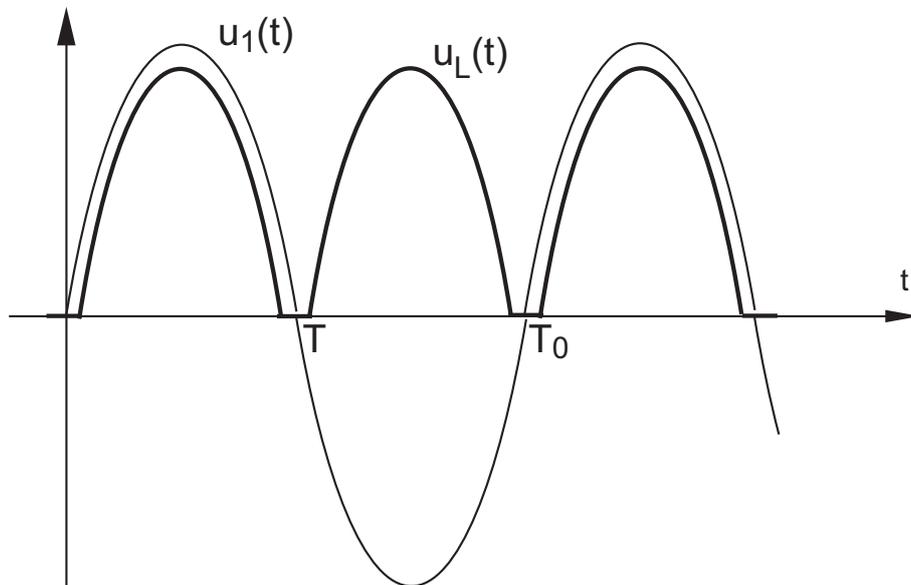


FIG. 2.7: Tensions dans un circuit redresseur double-alternance

Le redressement peut être à simple ou à double alternance. Dans ce dernier cas on fait souvent usage de ponts à diodes (figure 2.6a). Pendant les alternances positives, les diodes D_1 et D_2 conduisent alors que les diodes D_3 et D_4 sont bloquées. Pour les alternances négatives, seules les diodes D_3 et D_4 laissent circuler le courant. On notera que cette conduction alternée permet d'avoir un courant toujours positif dans la résistance de charge.

Dans le cas où la chute de tension causée par les deux diodes conductrices est prohibitive, on peut utiliser un transformateur à double enroulement (figure 2.6b) qui fait circuler le

courant dans une seule diode à la fois.

Dans ces deux cas, la tension aux bornes de la charge est une tension sinusoïdale redressée diminuée de la chute de tension dans les diodes redresseuses (figure 2.7). On montre aisément que la composante continue vaut suivant le circuit redresseur utilisé

$$U_{DC} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T u_L(t) dt \simeq \frac{2}{\pi} (\hat{U}_1 - 2V_j) \quad (2.12)$$

$$U_{DC} \equiv \frac{1}{T} \int_0^T u_L(t) dt \simeq \frac{2}{\pi} (\hat{U}_1 - V_j) \quad (2.13)$$

2.5 Redresseur avec condensateur de filtrage

Pour éviter que la tension sinusoïdale redressée descende vers 0 V, on peut stocker des charges électriques en provenance du redresseur dans un condensateur C pendant une fraction Δt de la période (les diodes sont alors conductrices). Elles seront ensuite restituées à la charge R_L pendant le temps restant où les diodes sont bloquées (figure 2.8).

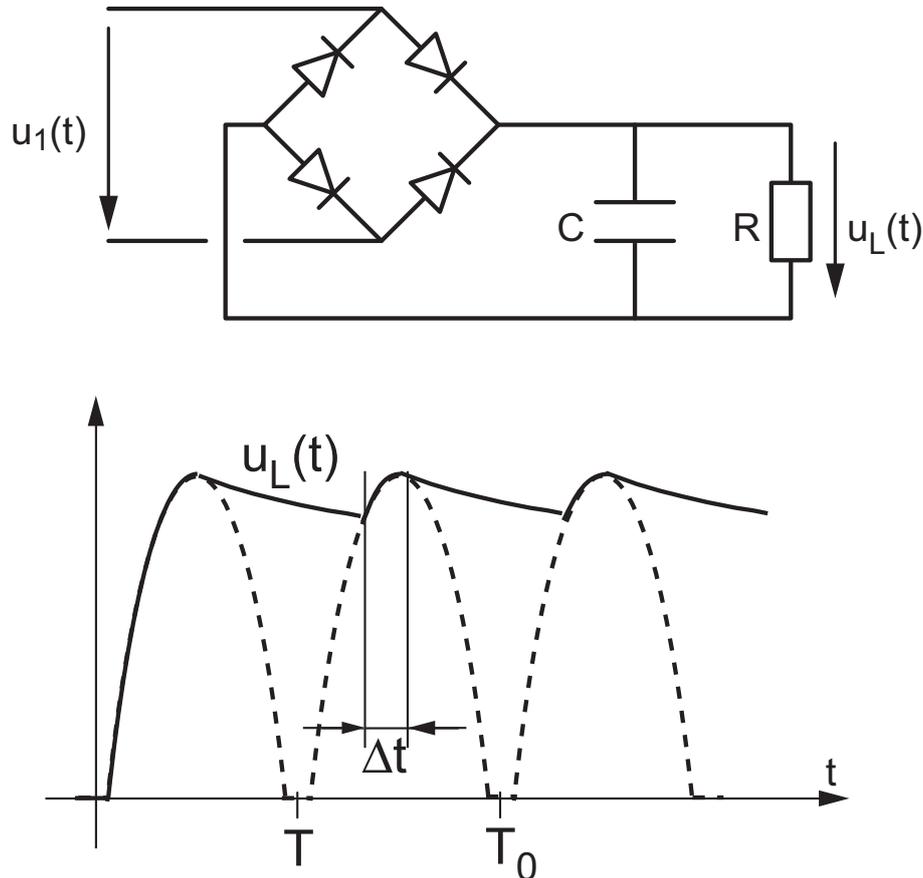


FIG. 2.8: Redresseur avec condensateur de filtrage

Lorsque la tension sinusoïdale est supérieure à la tension de la capacité (pendant Δt), celle-ci se charge rapidement à travers les diodes. Sa décharge ne peut se faire qu'à travers la résistance de charge R_L puisque les diodes bloquent le courant vers la source de tension $u_1(t)$.

Si l'on veut obtenir aux bornes de la capacité C , et donc aux bornes de la charge R_L , une tension $u_L(t)$ qui varie peu, il est nécessaire de décharger lentement la capacité à travers R_L . C'est la raison pour laquelle la valeur de la capacité est généralement élevée de manière à ce que la constante de temps CR_L soit sensiblement plus grande que la période du réseau $T_0 = 2T$.

On obtient ainsi une tension $u_L(t)$ composée d'une tension continue $U_{L,DC}$ à laquelle se superpose une tension variable $u_{L,ac}(t)$. Du point de vue de la charge, tout se passe comme si elle avait affaire à un générateur de tension continue avec une ondulation résiduelle.

2.5.1 Hypothèse

Le calcul de la tension résiduelle est simple si l'on connaît le temps Δt pendant lequel le pont redresseur conduit et charge la capacité. Malheureusement, il est difficile d'évaluer ce temps de conduction. On doit donc se contenter d'en prendre une estimation raisonnable basée sur l'expérience

$$\Delta t \simeq 0.2 T = 0.1 T_0 \quad (2.14)$$

Puisque Δt représente la durée de charge de la capacité, il est bien évident que le temps pendant lequel celle-ci se décharge vaut

$$t_{dech} = T - \Delta t \simeq 0.8 T = 0.4 T_0 \quad (2.15)$$

2.5.2 Tensions continue et résiduelle

Se souvenant de la loi de la décharge d'une capacité

$$u_C(t) = U_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

et observant que l'on a

$$U_0 = U_{C,max} = \sqrt{2}U_{1,eff} - 2V_j, \quad \tau = CR \quad (2.16)$$

on peut calculer la tension minimum qu'atteindra la capacité après le temps de décharge $t_{dech} = 0.4 T_0$:

$$U_{C,min} = U_{C,max} \exp\left(-\frac{t_{dech}}{CR}\right)$$

La variation de tension sur la capacité vaut donc

$$\Delta U_C = U_{C,max} - U_{C,min} = U_{C,max} \left(1 - \exp\left(-\frac{t_{dech}}{CR}\right)\right) \quad (2.17)$$

Ceci nous permet de calculer l'amplitude de l'ondulation

$$U_{ac} = \frac{U_{C,max} - U_{C,min}}{2} = \frac{\Delta U_C}{2} \quad (2.18)$$

ainsi que la tension moyenne appliquée à la charge

$$U_{dc} = \frac{U_{C,max} + U_{C,min}}{2} = U_{C,max} - U_{ac} \quad (2.19)$$

Application numérique

En choisissant, par exemple, $CR \simeq 3T_0$, on aura

$$\Delta U_C = U_{C,max} \left(1 - \exp\left(-\frac{0.4T_0}{3T_0}\right) \right) \simeq 0.12 U_{C,max}$$

$$U_{ac} = \frac{\Delta U_C}{2} \simeq 0.06 U_{C,max}, \quad U_{dc} \simeq 0.94 U_{C,max}$$

L'ondulation relative vaudra donc

$$\frac{U_{ac}}{U_{dc}} = \frac{0.06}{0.94} \simeq 6\%$$

2.6 Caractéristique d'une diode Zener

Lorsque l'on souhaite avoir une tension variant faiblement avec le courant, on utilise une diode Zener qui fonctionne dans son domaine de conduction inverse sans qu'elle soit détruite. Une diode Zener est fabriquée de manière à ce que sa tension de conduction inverse se situe à un niveau de tension connu et que sa pente soit aussi forte que possible. La figure 2.9 montre la caractéristique d'une telle diode dont la tension seuil se situe aux environs de 6 V. On y trouve également son symbole et son modèle linéaire d'ordre 1.

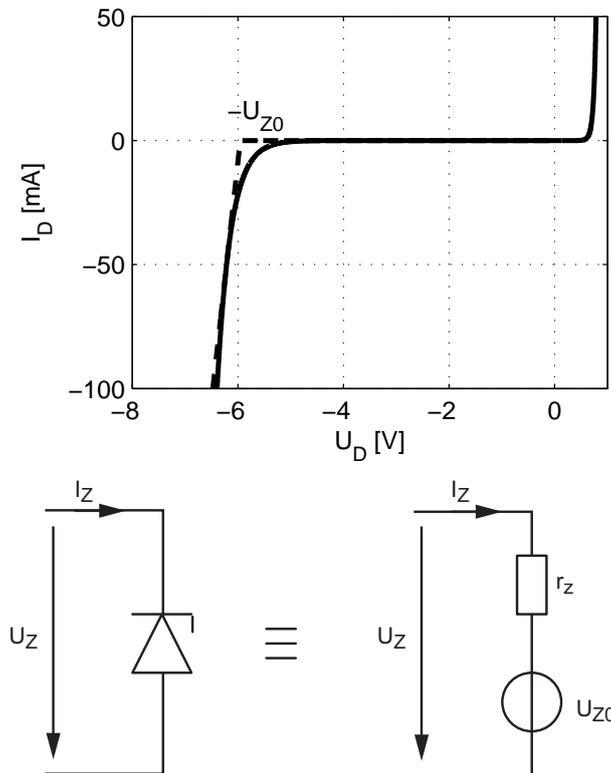


FIG. 2.9: Caractéristiques d'une diode Zener avec son symbole et son modèle

Comme une diode Zener est utilisée pour travailler en polarisation inverse, sa tension et son courant sont généralement considérés positivement :

$$U_Z = -U_D, \quad I_Z = -I_D \quad (2.20)$$

2 Circuits à diodes

Sa caractéristique non linéaire est également modélisée par un modèle linéaire d'ordre 1 dont les paramètres sont la tension de seuil U_{Z0} et la résistance différentielle r_z . La tension aux bornes de la diode se calcule alors aisément puisque l'on a

$$U_Z = U_{Z0} + r_z I_Z \quad (2.21)$$

Les fiches techniques des constructeurs fournissent, pour un point de fonctionnement donné, les valeurs moyennes de la tension U_Z et de la résistance différentielle r_z mesurée à une fréquence donnée. Par exemple,

$$U_Z = 6.2 \text{ V} @ I_Z = 50 \text{ mA}, \quad r_z = 4 \Omega @ f = 1 \text{ kHz}$$

Le modèle d'ordre 1 est ainsi complètement déterminé puisque la tension de seuil se calcule simplement avec

$$U_{Z0} = U_Z - r_z I_Z \quad (2.22)$$

Ce qui donne pour l'exemple considéré

$$U_{Z0} = 6.2 - 4 \cdot 0.05 = 6.0 \text{ V}$$

2.7 Redresseur avec condensateur et diode Zener

Considérons le redresseur double-alternance avec filtre capacitif et diode Zener de la figure 2.10 et étudions son comportement en recherchant les tensions continue et résiduelle fournies à la charge par le circuit.

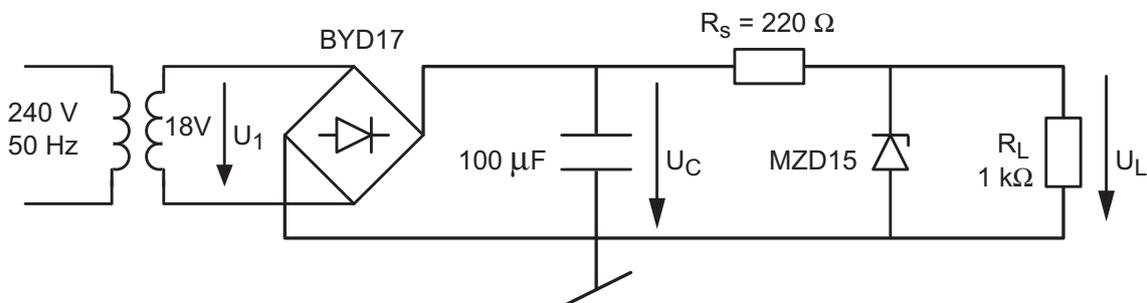


FIG. 2.10: Redresseur avec filtre capacitif et diode Zener

Pour cela, on va

1. esquisser les tensions et courants du circuit ;
2. rechercher les modèles des diodes ;
3. calculer $U_{C,max}$, $U_{C,min}$ puis $U_{C,dc}$, $U_{C,ac}$;
4. dessiner le schéma équivalent en aval de la capacité C ;
5. calculer $U_{L,dc}$ et $U_{L,ac}$;
6. calculer $I_{Z,min}$, $I_{Z,max}$ et la puissance moyenne dissipée par la diode Zener.

Graphes des tensions et courants Ils ont été obtenus avec une simulation Spice et il sont présentés dans la figure 2.11.

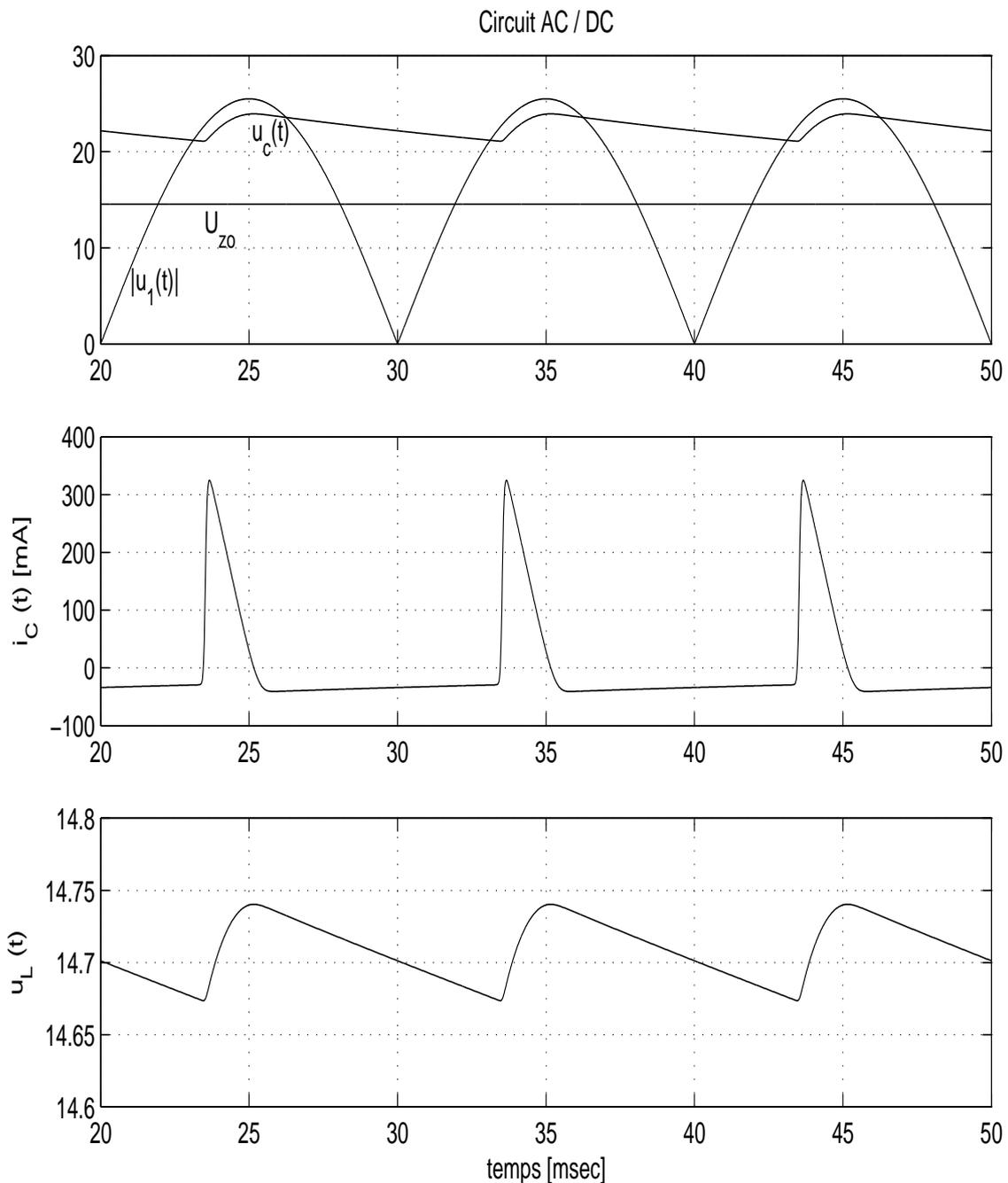


FIG. 2.11: Tensions et courants dans un circuit redresseur

Modèles des diodes Comme les diodes redresseuses vont fournir des pointes importantes de courant, il est raisonnable de choisir $V_j \simeq 1$ V. On peut vérifier cette valeur sur la fiche technique des diodes BYD17.

Les caractéristiques moyennes de la diode Zener MZD15 fournies par la fiche technique sont

$$U_Z \simeq 14.8 \text{ V} @ I_Z = 50 \text{ mA}, \quad r_z = 5 \Omega, \quad P_{max} = 1 \text{ W}$$

2 Circuits à diodes

On en déduit que la tension de seuil de la Zener vaut

$$U_{Z0} \simeq U_Z - r_z I_Z = 14.8 - 5 \cdot 50 \text{ mA} = 14.55 \text{ V}$$

Tensions aux bornes de la capacité Pour ce point, il est important de noter que la diode Zener *conductrice* est représentée par une source de tension U_{Z0} et que partant de sa tension maximum

$$U_{C,max} \simeq \sqrt{2}U_{1,eff} - 2V_j = \sqrt{2} \cdot 18 - 2 \cdot 1 = 23.46 \text{ V}$$

la capacité va se décharger asymptotiquement vers la tension du générateur U_{Z0} .

Partant alors de l'expression générale de l'évolution de la tension d'une capacité

$$u_C(t) = u_0 + (u_\infty - u_0) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right)$$

avec $u_0 = U_{C,max}, \quad u_\infty = U_{Z0}$
 $\tau = C (R_s + r_z // R_L) \simeq C (R_s + r_z) \simeq 22 \text{ ms}$

et se souvenant que, par hypothèse, la capacité se décharge pendant le temps

$$t_{dech} = T - \Delta t = 0.4 T_0$$

on peut calculer :

1. sa tension minimum

$$\begin{aligned} U_{C,min} &= U_{C,max} + (U_{Z0} - U_{C,max}) \left(1 - \exp\left(-\frac{0.4 T_0}{C (R_s + r_z)}\right) \right) \\ &= 23.66 + (14.55 - 23.66) \left(1 - \exp\left(-\frac{8 \text{ ms}}{22 \text{ ms}}\right) \right) = 20.74 \text{ V} \end{aligned}$$

2. la variation de sa tension

$$\Delta U_C = U_{C,max} - U_{C,min} = 2.72 \text{ V}$$

3. les composantes DC et AC de la tension fournies par la capacité

$$U_{C,dc} \simeq U_{C,max} - \frac{\Delta U_C}{2} = 23.46 - \frac{2.72}{2} = 22.1 \text{ V}$$

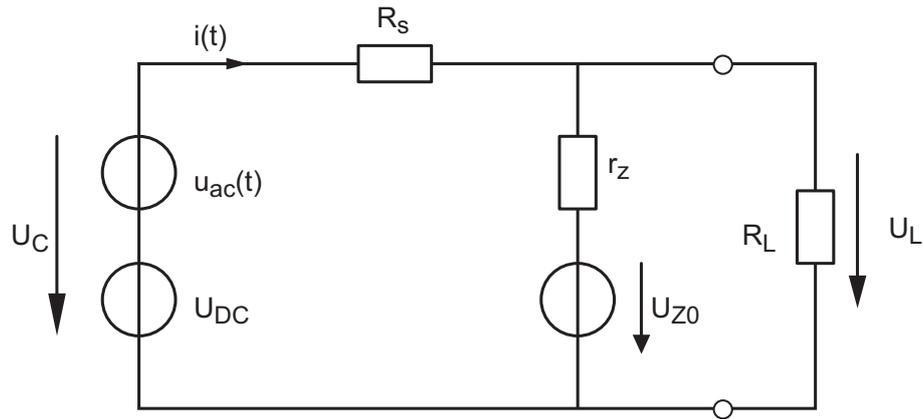
$$U_{C,ac} \simeq \frac{\Delta U_C}{2} = \frac{2.72}{2} = 1.36 \text{ V}$$

Schéma équivalent En remplaçant la capacité par deux générateurs de tensions continue et variable ainsi que la diode Zener par son modèle linéaire, on obtient le schéma de la figure 2.12. Partant de ce schéma, on calcule aisément les générateurs de Thévenin vus par la charge R_L :

$$R_{thv} = \frac{R_s r_z}{R_s + r_z} = 4.89 \Omega$$

$$U_{thv,dc} = \left(\frac{U_{DC}}{R_s} + \frac{U_{Z0}}{r_z} \right) R_{thv} = 14.72 \text{ V}$$

$$U_{thv,ac} = \frac{U_{ac}}{R_s} R_{thv} = 30.2 \text{ mV}$$

FIG. 2.12: Schéma équivalent d'un circuit redresseur vu par la charge R_L

Tension et puissance fournies à la charge Tenant compte des générateurs de Thévenin, on obtient aisément les composantes DC et AC apparaissant aux bornes de la charge R_L

$$U_{L,dc} = U_{thv,dc} \frac{R_L}{R_{thv} + R_L} = 14.65 \text{ V}$$

$$U_{L,ac} = U_{thv,ac} \frac{R_L}{R_{thv} + R_L} = 30 \text{ mV}$$

Ce qui donne une ondulation relative valant

$$\frac{U_{L,ac}}{U_{L,dc}} = \frac{30 \text{ mV}}{14.65 \text{ V}} \simeq 0.2\%$$

On notera que la puissance moyenne fournie à la charge vaut

$$P_{L,dc} = \frac{U_{L,dc}^2}{R_L} \simeq 0.2 \text{ W}$$

Courant et puissance dans la Zener Le courant maximum circulant dans la Zener vaut

$$I_{Z,max} = \frac{U_{L,max} - U_{Z0}}{r_z} = \frac{U_{L,dc} + U_{L,ac} - U_{Z0}}{r_z} = 25 \text{ mA}$$

Sa valeur minimum vaut

$$I_{Z,min} = \frac{U_{L,min} - U_{Z0}}{r_z} = \frac{U_{L,dc} - U_{L,ac} - U_{Z0}}{r_z} = 13 \text{ mA}$$

On constate ainsi que, pour pouvoir maintenir la tension U_L constante, le courant de Zener doit varier fortement. La puissance moyenne dissipée par la diode vaut

$$P_{z,moy} = U_{Z,moy} I_{Z,moy} = U_{L,dc} I_{Z,moy} = U_{L,dc} \frac{I_{Z,max} + I_{Z,min}}{2} \simeq 0.3 \text{ W}$$

Estimation de $I_{C,max}$ Considérant que la capacité de filtrage C sert de réservoir de charges entre le redresseur et le circuit aval constitué de R_s , D_Z et R_L , il est possible d'évaluer la pointe de courant que doit fournir le redresseur à la capacité C en tenant compte du fait que la charge reçue ΔQ pendant la durée de conduction $\Delta t \simeq 0.2T$ est restituée pendant le temps restant $T - \Delta t$.

Observant que la pointe de courant est approximativement triangulaire, on peut écrire

$$\Delta Q_1 \equiv \int_0^{\Delta t} i_C(t) dt \simeq \frac{1}{2} I_{C,max} \Delta t$$

Cette charge est restituée au circuit aval sous la forme d'un courant continu valant

$$I_{DC} = I_Z + I_L = \frac{U_{L,DC} - U_{Z0}}{r_z} + \frac{U_{L,DC}}{R_L} = 34 \text{ mA}$$

Comme la charge ΔQ_1 reçue par la capacité est égale à la charge ΔQ_2 fournie au circuit aval, on a

$$\begin{aligned} \Delta Q_1 &\equiv \int_0^{\Delta t} i_C(t) dt \simeq \frac{1}{2} I_{C,max} \Delta t \\ \Delta Q_2 &\equiv \int_{\Delta t}^{T-\Delta t} i_L(t) dt \simeq I_{DC} (T - \Delta t) \end{aligned}$$

On en déduit donc que la pointe de courant vaut

$$I_{C,max} \simeq 2 I_{DC} \frac{T - \Delta t}{\Delta t} = 2 I_{DC} \frac{0.8T}{0.2T} = 8 I_{DC} \simeq 270 \text{ mA}$$

Cette équation montre que la pointe de courant fournie par le redresseur à la capacité est beaucoup plus grande que le courant moyen I_{dc} .

Conclusions On notera que l'évaluation de $I_{C,max}$ que nous venons de faire dépend directement de la qualité de l'estimation initiale du temps de conduction Δt . Par contre, il est réconfortant de constater que les modèles linéaires et une estimation grossière du temps de conduction Δt nous permettent de trouver des valeurs très proches de celles obtenues par simulation (figure 2.11).

2.8 Fonctions non linéaires

2.8.1 Conformateurs à diodes

Les diodes sont souvent utilisées pour créer des caractéristiques non linéaires permettant de modifier la forme des signaux. Deux exemples sont présentés dans la figure 2.13.

Dans le premier circuit les diodes ne conduisent que si la tension d'entrée dépassent les seuils de Zener augmentés de la tension de seuil V_j de la diode normale. Ce qui donne

$$U_2 = \begin{cases} -9 \text{ V} & \text{si } U_1 < -9 \text{ V} \\ U_1 & \text{si } -9 \text{ V} \leq U_1 \leq +6 \text{ V} \\ +6 \text{ V} & \text{si } U_1 > +6 \text{ V} \end{cases}$$

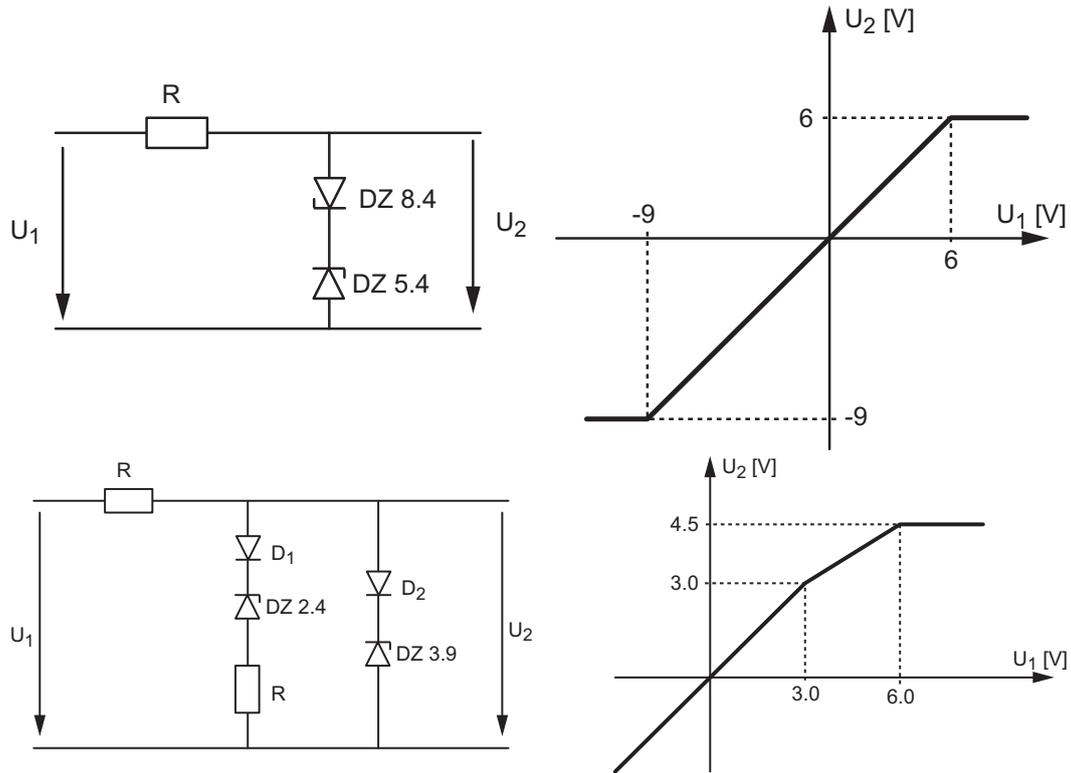


FIG. 2.13: Caractéristiques de transfert :
 a) d'une fonction de saturation ;
 b) d'une fonction non linéaire

Dans le deuxième circuit, on voit immédiatement qu'aucune diode ne conduit si la tension d'entrée est négative. De plus, il faut que U_1 augmente au delà de $0.6\text{ V} + 2.4\text{ V}$ pour que la première branche conduise. Une fois ce premier seuil passé, la pente du signal de sortie est dictée par le diviseur résistif qui vaut $1/2$. Enfin, la tension de sortie est limitée à $0.6\text{ V} + 3.9\text{ V}$ par la dernière branche du circuit. On a donc

$$U_2 = \begin{cases} U_1 & \text{si } U_1 < +3\text{ V} \\ \frac{1}{2} U_1 + 1.5\text{ V} & \text{si } +3\text{ V} \leq U_1 \leq +6\text{ V} \\ +4.5\text{ V} & \text{si } U_1 > +6\text{ V} \end{cases}$$

2.8.2 Redresseurs sans seuil

L'utilisation de diodes avec un ou plusieurs amplificateurs opérationnels permet de réaliser des circuits se comportant comme des diodes idéales à savoir que la tension de sortie est l'image de la tension d'entrée redressée en simple ou double-alternance. On notera que la matière qui suit doit être étudiée après le chapitre consacré à l'étude des amplificateurs opérationnels.

Redresseur non inverseur simple-alternance

Dans le cas de la figure 2.14, on a affaire à un redresseur simple-alternance. En effet, lorsque la tension U_1 est négative, la diode D_1 est bloquée et aucun courant ne circule

dans la résistance de charge R_L . La tension de la charge U_L est donc nulle lorsque $U_1 < 0$. De plus, comme il n'y a pas de réaction négative, l'AO sature immédiatement et la tension de sortie descend à $-U_{sat}$. Lorsque la tension U_1 est positive, la diode D_1 conduit et la réaction négative s'établit. On obtient alors

$$U_L = U_1 \quad U_2 = U_L + V_j \quad (2.23)$$

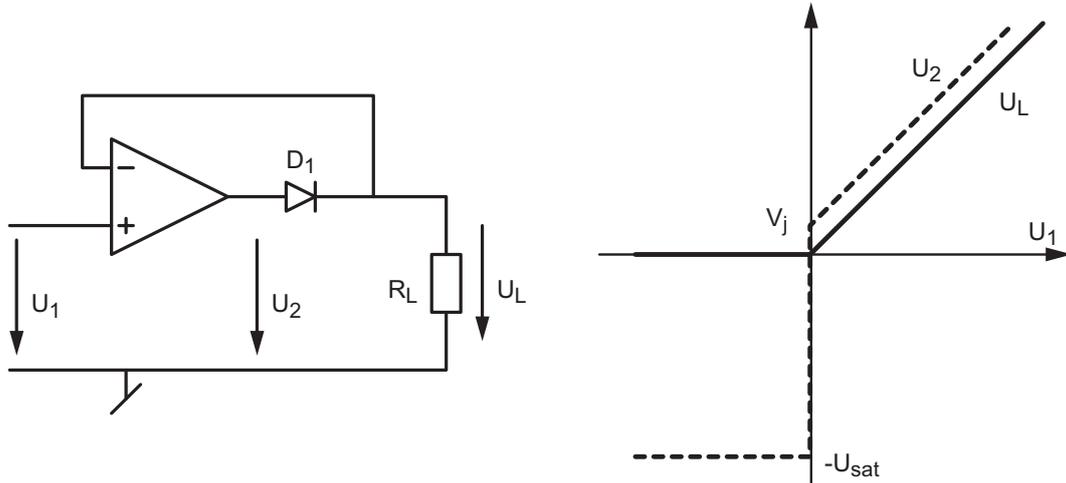


FIG. 2.14: Redresseur non inverseur simple-alternance

Ce qui, du point de vue de la charge R_L , donne un redressement mono-alternance de la tension d'entrée

$$U_L = \begin{cases} 0 & \text{si } U_1 < 0 \\ U_1 & \text{si } U_1 \geq 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

Commentaire Il est important de remarquer que la gamme de fréquences dans laquelle ce montage fonctionne correctement est limitée à quelques centaines de Hz. Cette limitation est liée au fait que la tension de sortie de l'amplificateur sature à la tension $-U_{sat}$ pour des tensions d'entrée négatives. Au moment précis où la tension d'entrée repasse par zéro pour reprendre une valeur positive, la tension de sortie de l'amplificateur doit exécuter une excursion d'amplitude énorme, de $-U_{sat}$ à $+V_j$, ce qui ne peut pas se faire en un temps infiniment court en raison du taux de variation limité (slew-rate) de la tension de sortie de l'amplificateur opérationnel.

Redresseur inverseur simple-alternance

Ce montage (figure 2.15), similaire au précédent, est basé sur l'amplificateur inverseur auquel on ajoute une diode supplémentaire D_2 évitant à l'amplificateur opérationnel de saturer.

Lorsque la tension U_1 est positive, la diode D_1 est bloquée et il n'y a pas de réaction négative via R_2 et D_1 ; aucun courant ne circulant dans la charge R_L , la tension U_L est nulle. Comme la diode D_2 conduit, la tension de sortie U_2 de l'AO est limitée à $-V_j$ et l'on a

$$U_L = 0, \quad U_2 = -V_j$$

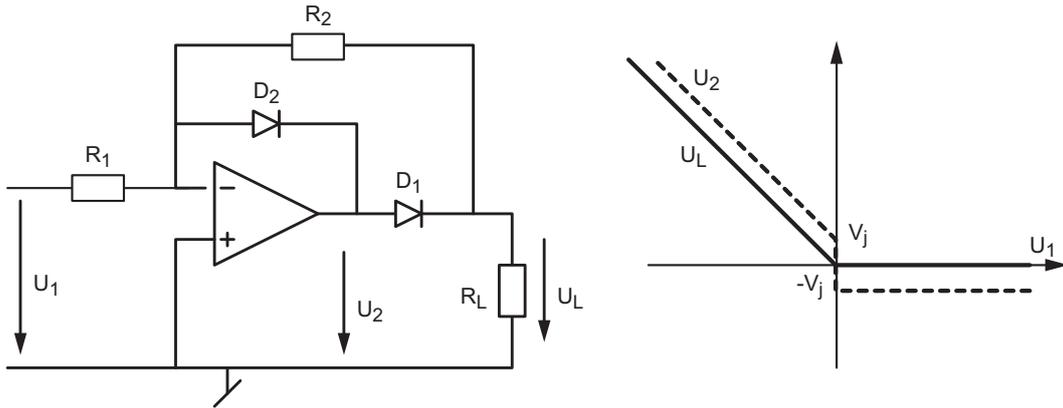


FIG. 2.15: Redresseur inverseur simple-alternance

Lorsque la tension U_1 est négative, la diode D_1 conduit alors que D_2 est bloquée. La réaction négative s'établit à travers R_2 et D_1 et l'on a

$$U_L = -\frac{R_2}{R_1} U_1, \quad U_2 = U_L + V_j$$

En choisissant $R_1 = R_2 = R$, on obtient la caractéristique de transfert d'un redresseur inverseur simple-alternance sans seuil

$$U_L = \begin{cases} -U_1 & \text{si } U_1 < 0 \\ 0 & \text{si } U_1 \geq 0 \end{cases} \quad (2.25)$$

Commentaire Grâce à la diode D_2 , on améliore considérablement la réponse en fréquence du circuit. En effet, comme cette diode évite à l'amplificateur opérationnel de saturer, l'excursion de la tension de sortie reste très limitée au moment de l'inversion de signe du signal d'entrée. Une solution équivalente n'est pas applicable au montage redresseur non-inverseur en raison de l'absence des résistances R_1 et R_2 .

Redresseur double-alternance

Plusieurs redresseurs double-alternance sans seuil peuvent être réalisés sur la base des redresseurs simple-alternance vus précédemment. On se contente ici d'en présenter un exemple (figure 2.16).

Dans ce montage, on utilise comme étage de sortie un sommateur à deux entrées. La première entrée reçoit directement la tension d'entrée U_1 qui est simplement inversée

$$U_L(U_1) = -\frac{2R}{2R} U_1 = -U_1$$

La deuxième entrée reçoit le signal redressé mono-alternance et inversé. Le sommateur va l'amplifier et l'inverser une deuxième fois ; ce qui donne

$$U_L(U_2) = -\frac{2R}{R} U_2 = -2U_2 = -2 \begin{pmatrix} 0 \\ -U_1 \end{pmatrix} = \begin{cases} 0 & \text{si } U_1 < 0 \\ +2U_1 & \text{si } U_1 \geq 0 \end{cases}$$

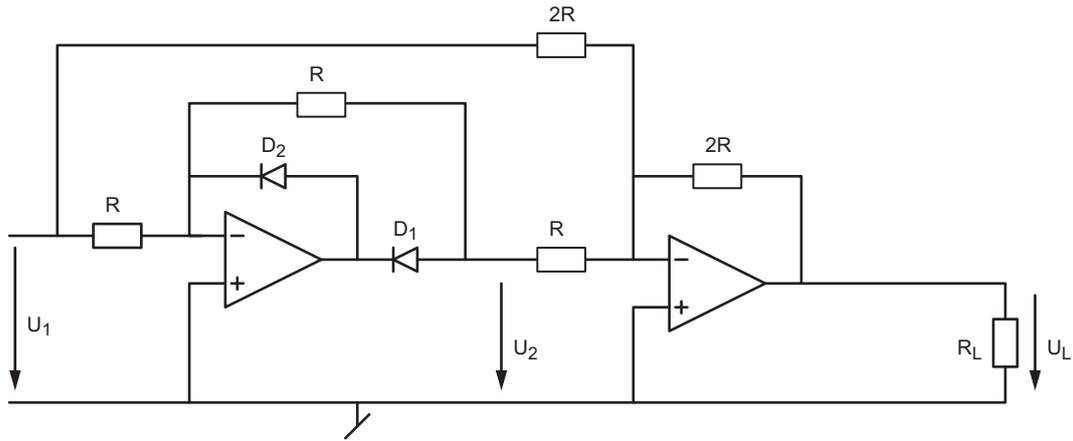


FIG. 2.16: Redresseur non inverseur double-alternance

Comme la tension de sortie du sommateur est égale à la somme de ces deux effets, on obtient finalement

$$U_L = U_L(U_1) + U_L(U_2) = \begin{pmatrix} -U_1 + 0 \\ -U_1 + 2U_1 \end{pmatrix} = \begin{cases} -U_1 & \text{si } U_1 < 0 \\ +U_1 & \text{si } U_1 \geq 0 \end{cases} \quad (2.26)$$

Cette équation du redresseur double-alternance n'est autre que la fonction valeur absolue :

$$U_L = |U_1| \quad (2.27)$$

Pour obtenir un redresseur double-alternance *inverseur*, on inverse simplement les deux diodes.

2.9 Exercices

D 1 : Considérant une diode décrite par $n = 1.5$ et $I_s = 0.1$ [nA] :

1. Calculez la tension à ses bornes lorsque $I_D = 0.1$ [mA], 1 [mA], 10 [mA], 100 [mA].
2. Que vaut la variation de U_D par rapport à celle de I_D ?
3. Donnez les modèles d'ordre 0 et d'ordre 1 lorsque $I_D = 10$ [mA].
4. Dessinez ces caractéristiques.

D 2 : Pour le circuit de la figure 2.17 :

1. Calculez et tracez la caractéristique de transfert $U_2 = f(U_1)$ sachant que l'on a

$$R = 10 \text{ k}\Omega, \quad V_{DC} = 2 \text{ V}, \quad V_j = 0.6 \text{ V}$$

2. Esquissez $u_1(t)$ et $u_2(t)$ sachant que $u_1(t)$ est une tension triangulaire d'amplitude $A = 12 \text{ V}$ et de période $T = 10 \text{ msec}$.
3. Calculez les courants dans les diodes D_1 et D_2 lorsque $u_1 = 8 \text{ V}$.

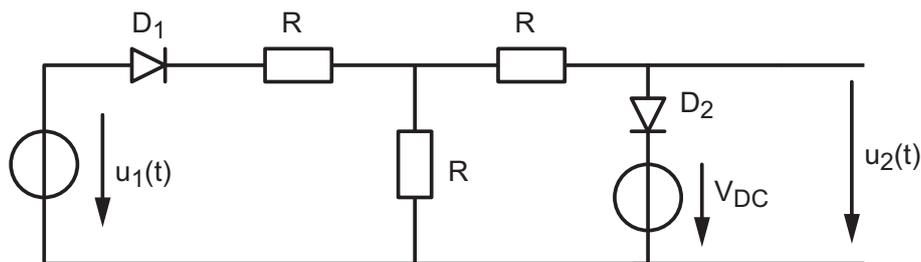


FIG. 2.17: Exercice D2

D 3 : Considérant le circuit de la figure 2.18 :

1. Calculez et tracez la caractéristique de transfert $U_2 = f(U_1)$ sachant que l'on a

$$R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega, \quad V_j = 0.6 \text{ V}$$

2. Esquissez $u_1(t)$ et $u_2(t)$ sachant que $u_1(t)$ est une tension triangulaire d'amplitude $A = 2.4 \text{ V} = 4 V_j$ et de période $T = 10 \text{ msec}$.
3. On souhaite que l'alternance négative de $u_2(t)$ ait la même forme que l'alternance positive ; comment modifiez-vous le schéma ?

D 4 : Sachant que les diodes du circuit de la figure 2.19a sont caractérisées par $V_j = 0.6 \text{ V}$, $r_d = 3 \Omega$ pour D_1 et $V_j = 0.8 \text{ V}$, $r_d = 1 \Omega$ pour D_2 , calculez les courants dans chaque diode lorsque la résistance R vaut $10 \text{ k}\Omega$ et $1 \text{ k}\Omega$ alors que $U_g = 100 \text{ V}$.

D 5 : Admettant que la constante de temps RC est beaucoup plus grande que la période du générateur sinusoïdal $u_1(t)$, montrez que le circuit de la figure 2.19b fournit à la charge une tension double de la tension de crête du générateur $u_1(t)$.

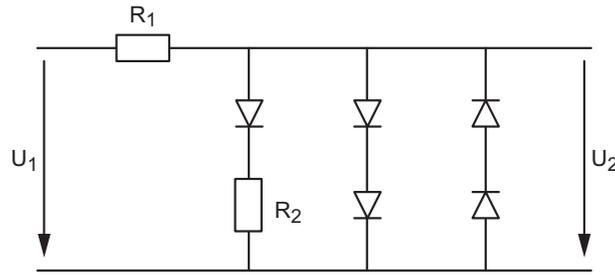


FIG. 2.18: Exercice D3

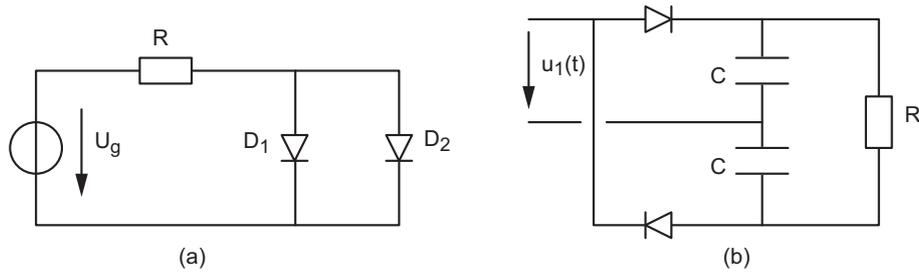


FIG. 2.19: Exercices D4 et D5

D 6 : Considérant le circuit de la figure 2.20 avec les composants suivants

$$C = 220 \mu\text{F}, \quad R_s = 330 \Omega, \quad R_L = 1 \text{ k}\Omega$$

$$D_Z = \text{MZD20} \quad \text{telle que} \quad \begin{cases} U_Z \simeq 20 \text{ V} & @ \quad I_Z = 25 \text{ mA} \\ r_z \simeq 6 \Omega & @ \quad f = 1 \text{ kHz} \end{cases}$$

calculez les composantes AC et DC des tensions $u_2(t)$ et $u_3(t)$ ainsi que la puissance moyenne dissipée par la diode Zener.

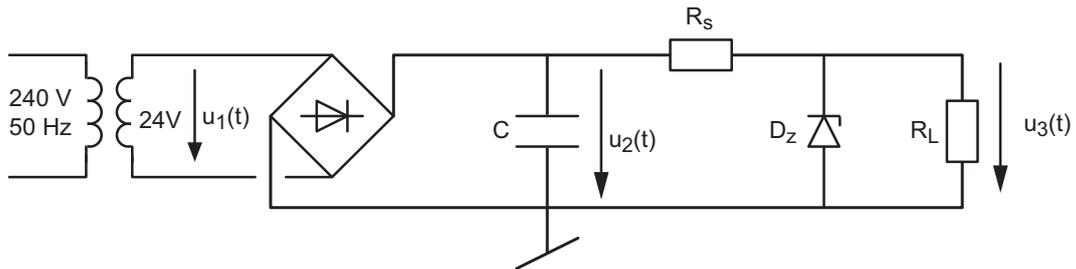


FIG. 2.20: Exercice D6

D 7 : Considérant le redresseur sans seuil de la figure 2.15, calculez les tensions U_2 , U_L et les courants circulant dans les diodes, les résistances et l'AO lorsque

$$U_1 = \pm 5 \text{ V}, \quad V_j = 0.6 \text{ V}, \quad R = 10 \text{ k}\Omega, \quad R_L = 1 \text{ k}\Omega$$

D 8 : Idem exercice précédent, mais pour le redresseur sans seuil double-alternance de la figure 2.16.