

Pr. A. MAAOUNI

Electronique Analogique, SMP5-IEA

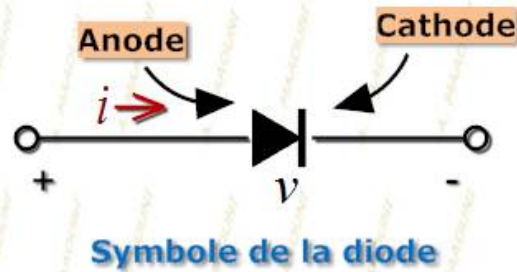
Année - 2011-2012

Diodes et circuits à diodes

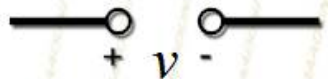
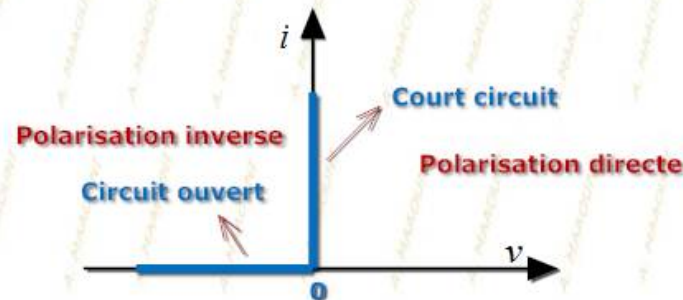
Chapitre 1

- La diode est un semi conducteur de base : on ne peut pas combiner du Silicium (Germanium) dopé plus simplement.
- Son fonctionnement macroscopique est assimilable à un interrupteur commandé qui ne laisse passer le courant que dans un sens.
- Une telle propriété lui œuvre un champ d'applications très vaste en électronique :
 - redressement,
 - détection de pic de signaux
 - régulation
 - écrêtage de signaux
 - multiplieur de tension
 - portes logiques, etc.

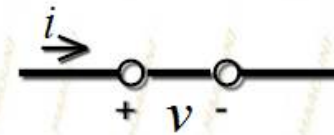
La diode est un élément non linéaire symbolisé ainsi



La caractéristique courant tension de la diode idéale est représentée ci-dessous :



$$v < 0 \Rightarrow i = 0$$

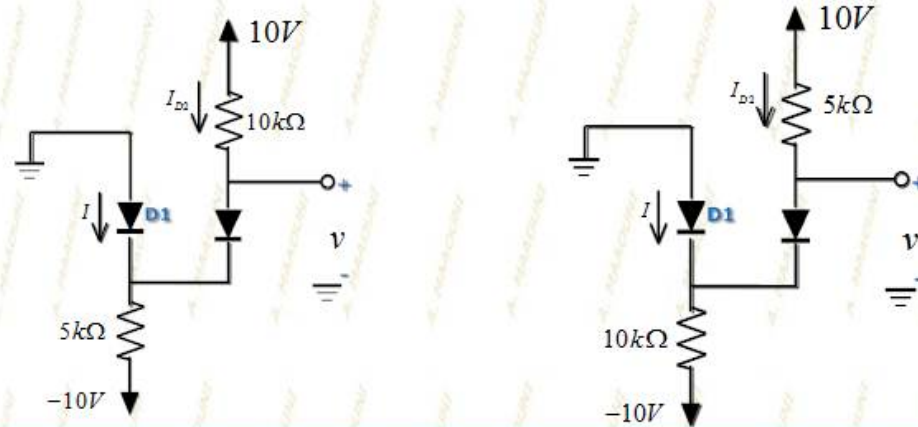


$$i < 0 \Rightarrow v = 0$$

Exemple 1

4

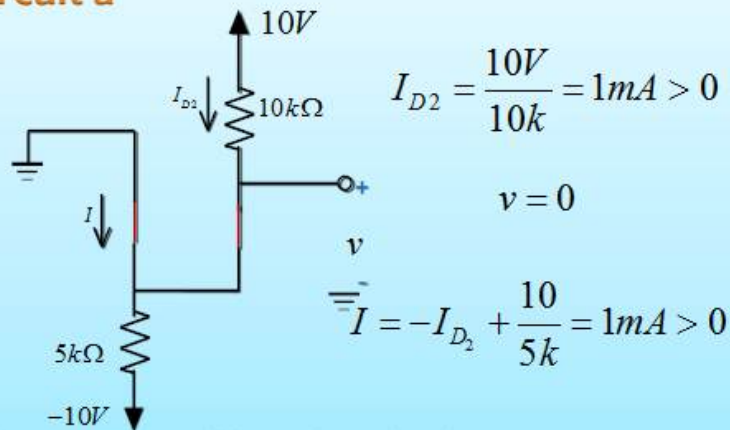
On suppose que les diodes des circuits suivants sont idéales. Déterminer pour chaque circuit le courant i et la tension v .



On **suppose** que les deux diodes conduisent pour les deux schémas. On doit donc avoir :

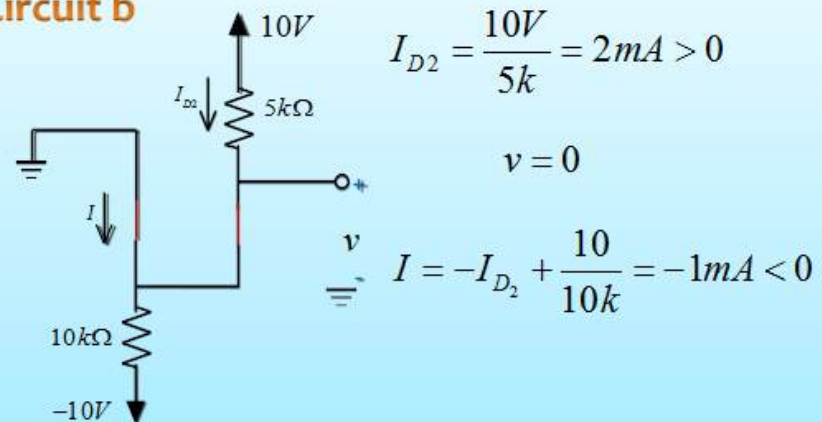
$$I > 0 \text{ \& } I_{D2}$$

Circuit a



Effectivement l'état des diodes est correct

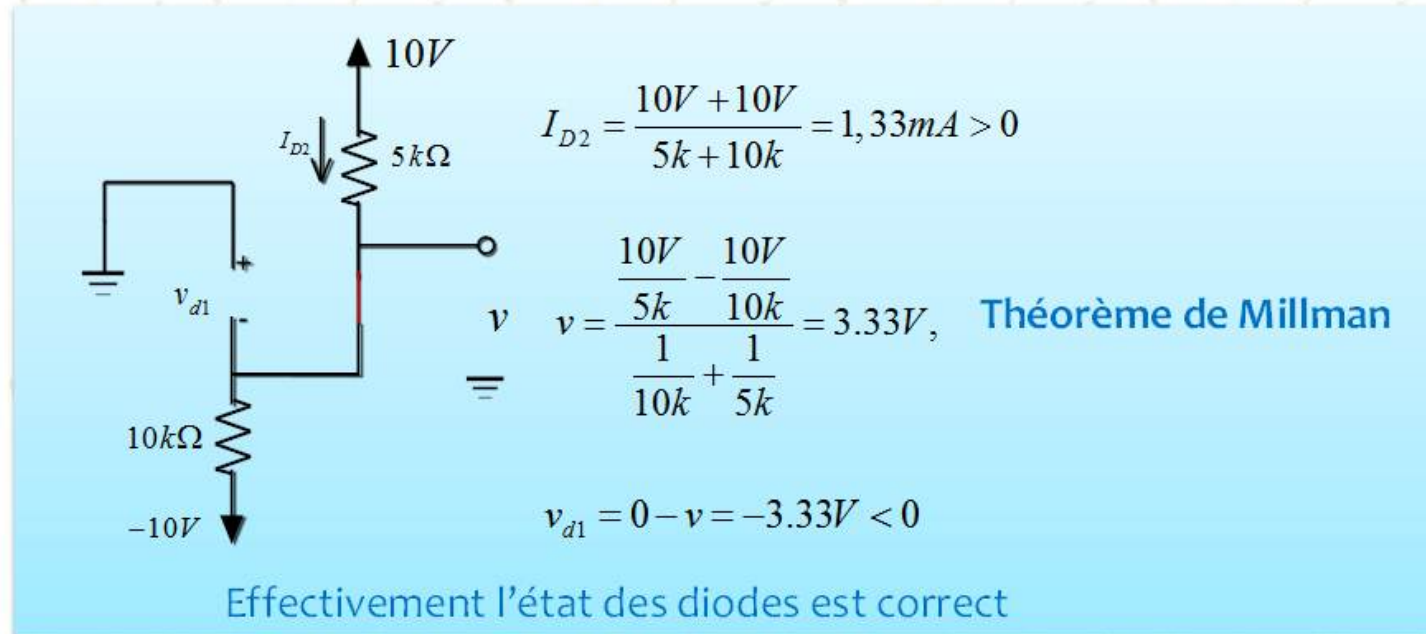
Circuit b

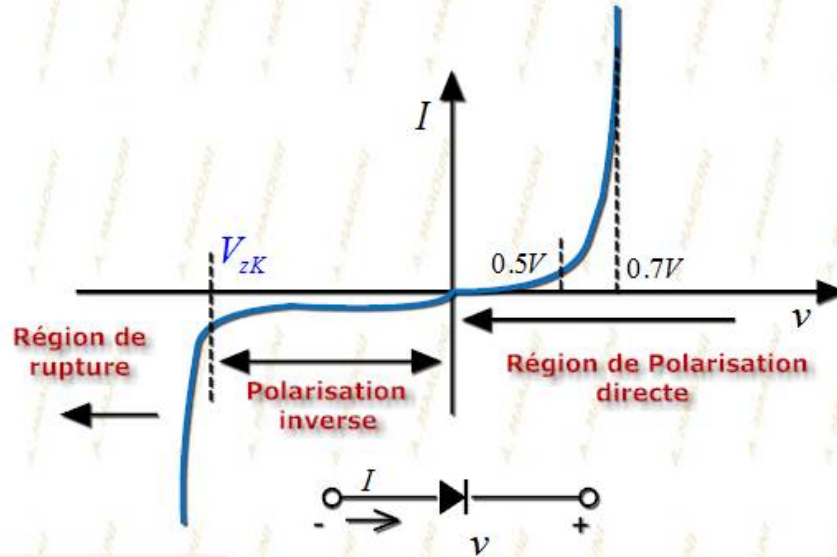


L'état des diodes est faux puisque $I < 0$

On **suppose** maintenant **la diode D1 bloquée** et **la diode D2 conductrice**, il en résulte le schéma suivant avec la condition à satisfaire :

$$V_{d1} < 0 \text{ \& } I_{D2} > 0$$





Région de polarisation directe

Dans cette région la tension est positive et la caractéristique $i - v$ est décrite par l'équation suivante :

$$i = I_s (e^{v/\eta V_T} - 1)$$

I_s : est le courant de saturation dépendant de la température et des caractéristiques physiques de la Jonction

V_T : Tension thermique qui dépend de la Température T, donnée par l'expression

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J / } ^\circ\text{K}$$

$$q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Constante de Boltzmann

$$T(^{\circ}\text{K})$$

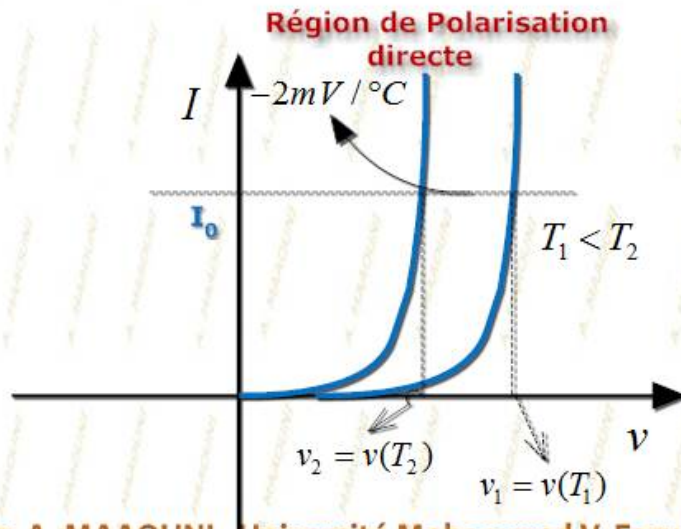
A une température de 20° , la tension V_T vaut 25.2mV. A température ambiante, on prend généralement pour V_T 25mV.

η : Généralement compris entre 1 et 2. Pour les diodes en circuits intégrés $\eta=1$ et pour les diodes en tant que composants discrets, $\eta=2$. On prendra $\eta=1$ dans toute la suite sauf spécification.

Le courant I étant très supérieur au courant de saturation, on peut écrire :

$$I \approx I_s e^{v/nV_T}, \quad v \approx nV_T \ln\left(\frac{I}{I_s}\right)$$

Pour un courant I_0 la tension aux bornes de la diode varie en fonction de la température :



Quand la température augmente, la tension aux bornes de la diode diminue à raison de $2\text{mV}/^\circ\text{C}$.

Région de polarisation inverse

Quand la tension v aux bornes de la diode devient négative et inférieure en module à $5nV_T$,

$$e^{v/nV_T} \ll 1 \rightarrow I \approx -I_s$$

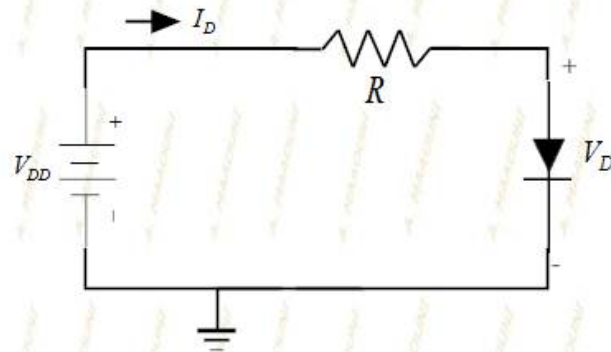
En fait, pour une diode réelle, le courant inverse même étant faible, reste supérieur à I_s typiquement de 10^{-8} à 10^{-15} A pour les composants discrets. Il est de l'ordre des nA.

Région de claquage

C'est la région correspondant à : $V < V_{zk} < 0$

Le courant augmente très rapidement alors que la tension reste sensiblement égale à V_{zk} . Cette dernière est appelée tension Zener. Le fonctionnement de la diode dans cette région est à la base de la régulation en tension.

Modèle exponentiel



Supposons que $V_{DD} > 0.5V$

On peut représenter la diode par la caractéristique

$$I_D = I_S e^{V_D / \eta V_T}$$

D'autre part, la loi des mailles, donne :

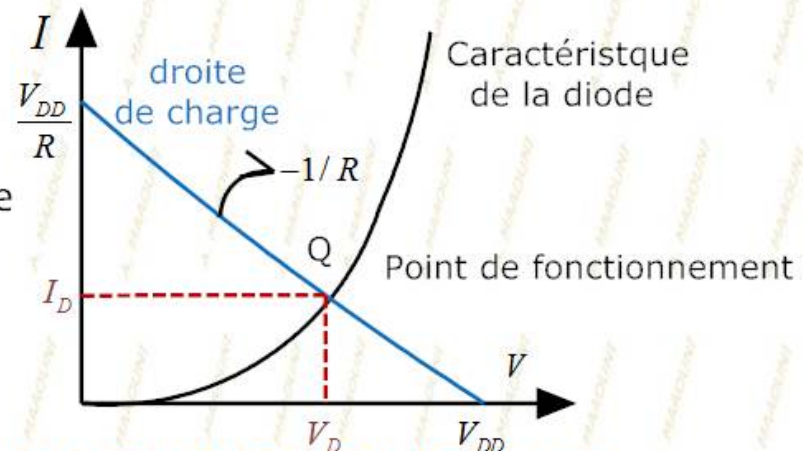
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} \quad \text{Droite de charge}$$

I_S , η , V_T étant connus, les deux équations forment un système d'équations non linéaires.

Deux méthodes de résolution sont possibles :

MÉTHODE GRAPHIQUE :

On trace la droite de charge et la caractéristique de la diode dans le repère $I - V$. L'intersection donne le point de fonctionnement Q .



Exemple 2

Déterminer le courant et la tension dans le circuit précédent avec $V_{DD} = 5V$ et $R = 1k\Omega$. On suppose que la diode est traversée par un courant de 1mA lorsqu'elle est soumise à une tension de 0.7V et la tension augmente de 0.1V pour chaque décade de courant.

Pour commencer l'itération, on suppose que $V_D = 0.7V$. A l'aide de la droite de charge, on obtient

$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0.7}{1k} = 4.3mA$$

D'autre part, on a pour un couple (I_1, V_1) , (I_2, V_2) de la caractéristique de la diode :

$$V_2 - V_1 = 2.3\eta V_T \log\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$$

$2.3\eta V_T$: représente l'augmentation de la tension sur une **décade** de courant.

Dans cet exemple, on a :

$$2.3\eta V_T = 0.1V$$

La nouvelle valeur de la tension V_D se déduit à partir de l'équation :

$$V_D - 0.7 = 0.1 \log\left(\frac{4.3mA}{1mA}\right) \rightarrow \overbrace{V_D = 0.763V}^{\text{Première itération}}$$

La valeur précédente est maintenant prise comme valeur initiale, on recommence la procédure :

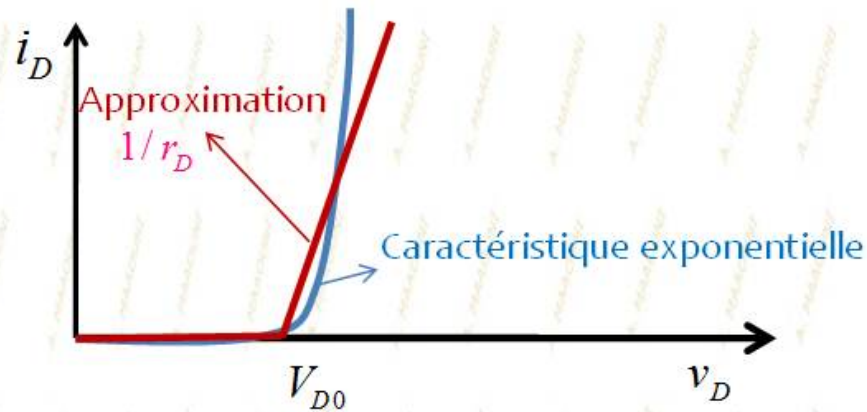
et
$$I_D = \frac{V_{DD} - V_D}{R} = \frac{5 - 0.763}{1k} = 4.237mA$$

$$V_D - 0.763V = 0.1 \log\left(\frac{4.237mA}{4.3mA}\right) \rightarrow \overbrace{V_D = 0.762V}^{\text{Seconde itération}}$$

Les résultats des deux itérations diffèrent peu, on peut prendre pour résultat :

$$I_D = 4.237mA, \quad V_D = 0.762V$$

Troisième approximation :



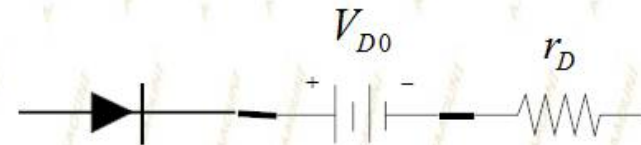
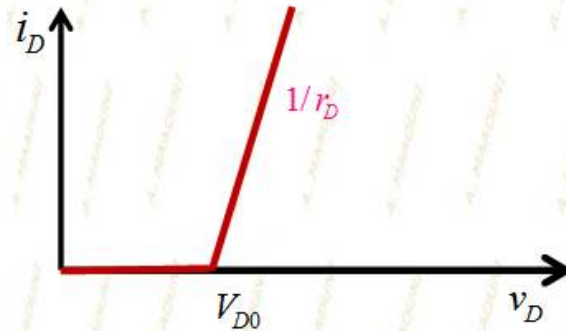
On approxime la caractéristique par les deux morceaux de droites.

Équations :

$$i_D = 0, \quad v_D < V_{D0}$$

$$i_D = \frac{v_D - V_{D0}}{r_D}, \quad v_D > V_{D0}$$

On peut donc représenter une diode réelle par son circuit approximatif pour une étude rapide.

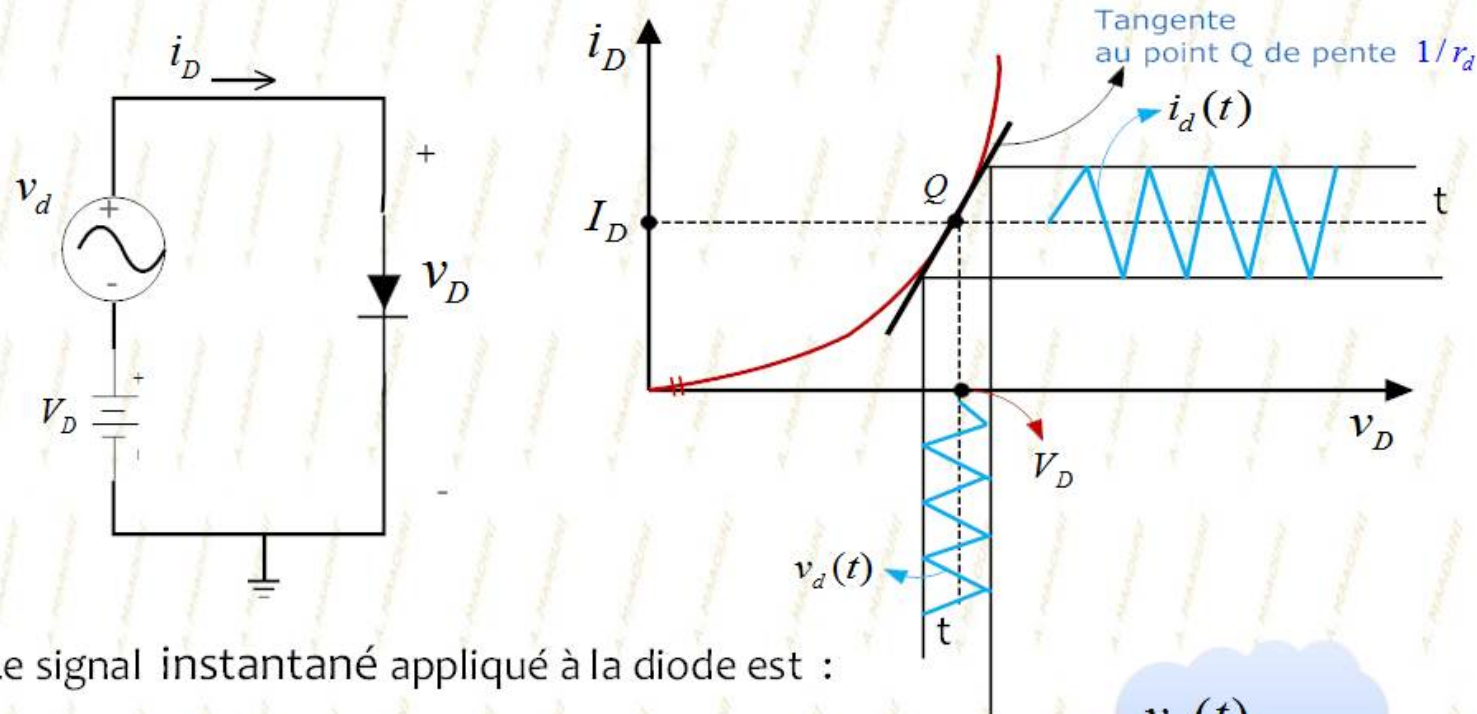


Seconde approximation :

Un modèle encore plus simplifié consiste à remplacer la résistance r_D par un (CC)



Dans quelques applications, on cherche à déterminer le comportement en AC du circuit à diodes autour d'un point de fonctionnement. On a donc une superposition d'un signal DC et d'un signal AC de faible amplitude.



Le signal instantané appliqué à la diode est :

$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$

Auquel correspond le courant :

$$i_D(t) = I_s e^{v_D(t)/\eta V_T} = \overbrace{I_s e^{V_D/\eta V_T}}^{I_D} e^{v_d(t)/\eta V_T} \simeq I_D \left(1 + \frac{v_d(t)}{\eta V_T} \right)$$

$$\frac{v_d(t)}{\eta V_T} \ll 1$$

Le courant dans la diode est la somme de deux composantes : DC et AC, soit :

$$i_D(t) \simeq I_D + \overbrace{i_d(t)} = I_D + I_D \frac{v_d(t)}{\eta V_T}$$

La composante variable du courant est proportionnelle à celle en tension :

$$i_d(t) = \overbrace{\frac{I_D}{\eta V_T}}^{g_d} v_d(t), \quad v_d(t) = \overbrace{\frac{\eta V_T}{I_D}}^{r_d} i_d(t)$$

g_d, r_d sont respectivement la conductance et la résistance dynamique.

Remarque : On peut obtenir la résistance dynamique directement en calculant l'inverse de la pente de la tangente au point Q (cf. figure précédente).

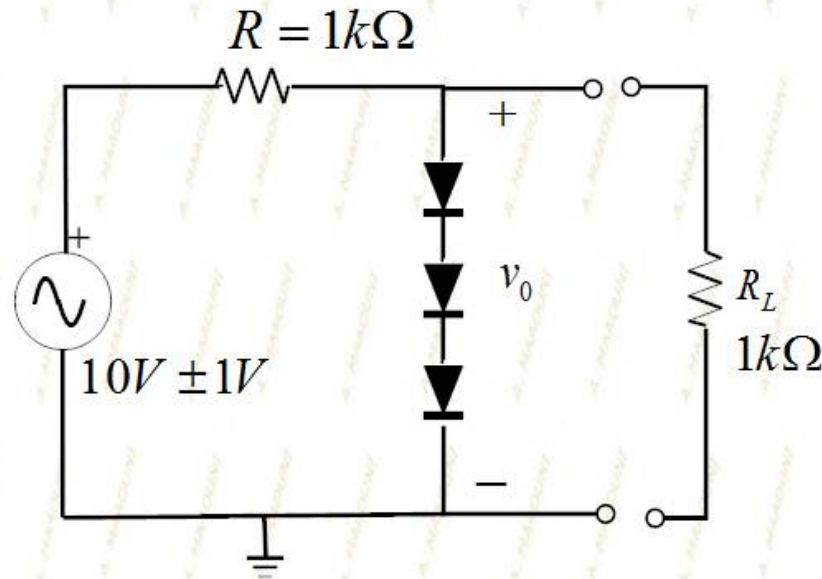
$$r_d = 1 / \left(\frac{di_D}{dv_D} \right)_{v_D=V_D}$$

Exemple 3

Les 3 diodes sont utilisées pour obtenir une tension constante de 2.1V.
Calculer la variation de la cette tension régulée quand :

1. L'alimentation varie de 10%

On prendra $\eta=2$.



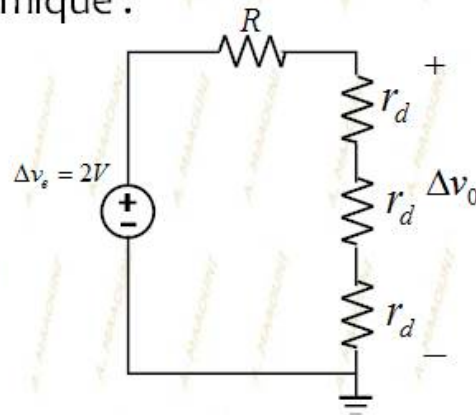
Courant dans les diodes :

$$I = \frac{10 - 2.1}{1k} = 7.9mA$$

Résistance dynamique r_d de chaque diode :

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I} = 2 \frac{25mV}{7.9mA} = 6.3\Omega$$

Modèle dynamique :

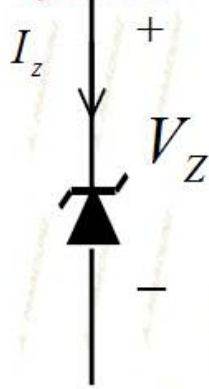


Diviseur de tension :

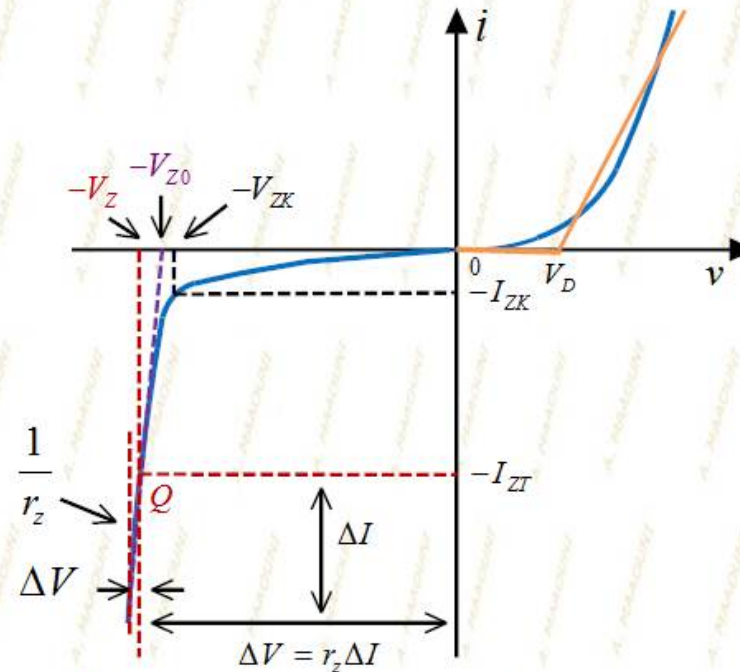
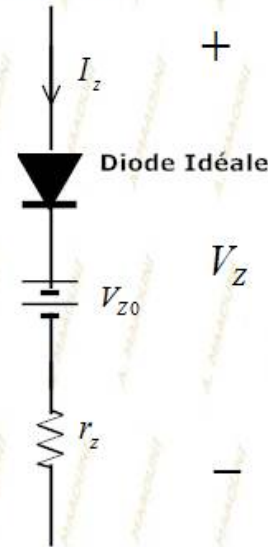
$$\Delta v_0 = \frac{3r_d}{3r_d + R} \Delta v_e = 37.1mV$$

Dans la région de claquage, lorsque le courant est inférieur au courant de coude spécifié par le constructeur, la tension reste quasi constante. Ce comportement est à la base de la régulation.

Symbole



Modèle



Le constructeur spécifie la tension Zener V_Z à un courant test I_{ZT} (point Q)

Une variation de courant par rapport à I_{ZT} entraîne une variation de tension qui lui est proportionnelle :

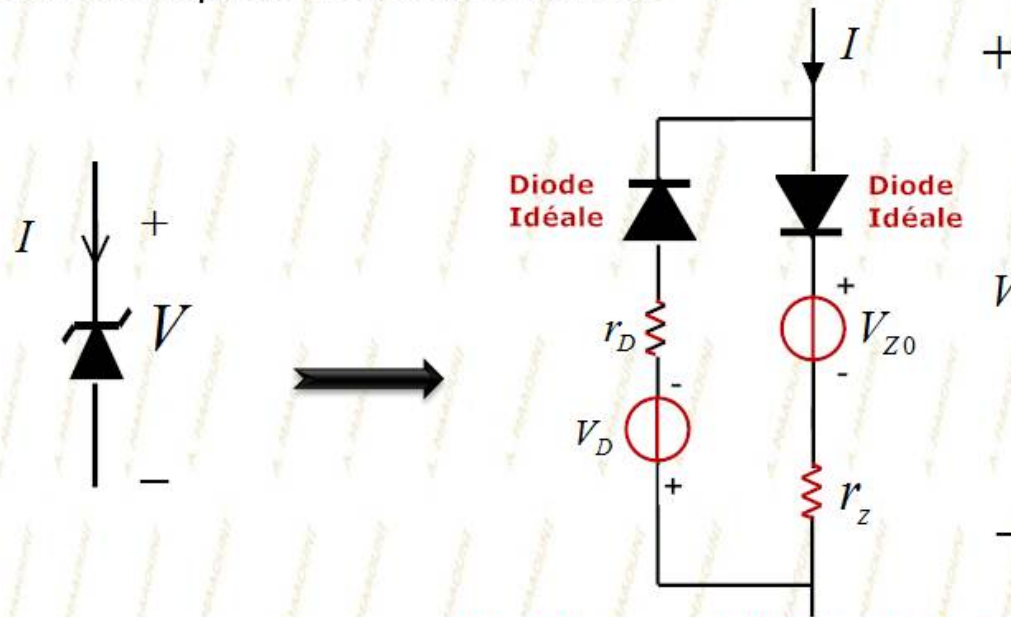
$$\Delta V = r_z \Delta I$$

r_z : 1/Pente de la tangente au point Q, (quelques Ohms à une dizaine d'ohms)

V_{Z0} : Intersection entre tangente en Q et axe y.

La tension V_z varie selon les diodes de quelques volts à quelques centaines de volts.

Le modèle complet de la diode Zener valable pour les deux polarisations inverse et directe peut être représentée sous la forme :



Modèle complet de la diode Zener

Equations

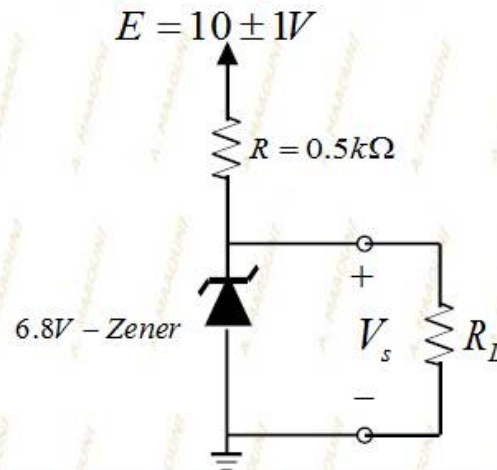
$$\left\{ \begin{array}{ll} I = \frac{V - V_{z0}}{r_z}, & V > V_{z0} \\ I = \frac{V + V_D}{r_D}, & V < -V_D \\ I \approx 0, & V_{z0} > V > -V_D \end{array} \right.$$

Régulateur à diode Zener

Exemple 4

Une diode Zener de tension Zener $V_Z = 6.8V$ pour un courant test I_{ZT} de 5mA et $r_z \approx 20\Omega$, $I_{ZK} = 0.2mA$ est utilisée comme régulateur de tension (cf. figure). L'alimentation a une valeur nominale de 10V et varie de $\pm 1V$.

1. Trouver la tension de sortie sans charge pour la valeur nominale de E.
2. Déterminer la variation de la tension de sortie pour une variation de $\pm 1V$ de E.
3. Déterminer la variation de la sortie quand on connecte une charge qui absorbe un courant de 1mA et en déduire $\Delta V_s / \Delta I_L$.
4. Déterminer la variation de la sortie pour $R_L = 2k\Omega$, $R_L = 0.5k\Omega$.
5. Quelle est la valeur minimale pour laquelle la diode Zener opère dans la zone de claquage?



Détermination de la tension V_{Z0}

$$V_{Z0} = V_z - r_z I_z = 6.8 - 20 \times 5m = 6.7V$$

Tension de sortie pour l'entrée nominale

Théorème de Millman

$$V_s = \frac{\frac{E}{R} + \frac{V_{Z0}}{r_z}}{\frac{1}{r_z} + \frac{1}{R}} = \frac{r_z E + R V_{Z0}}{r_z + R} = \frac{20 \times 10 + 0.5k \times 6.7}{0.5k + 20} = 6.83V$$

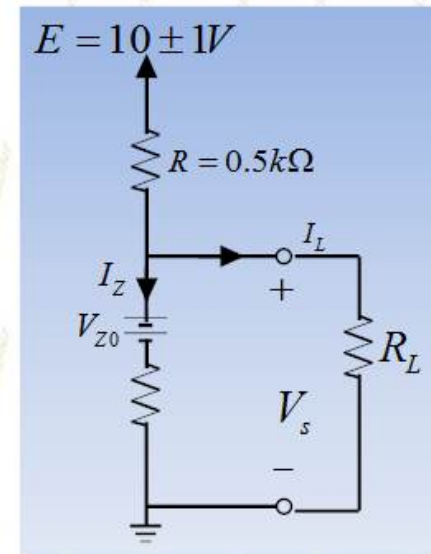
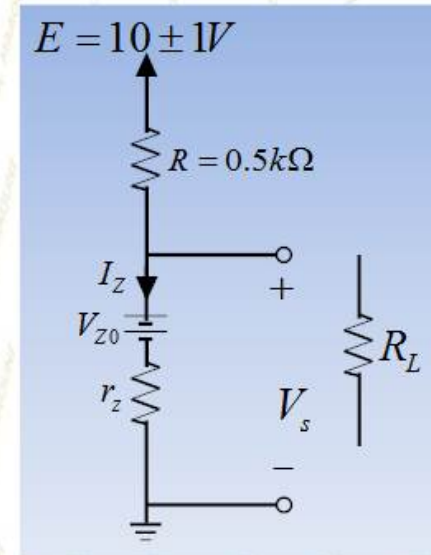
Variation de la sortie en fonction de celle de l'entrée

$$V_s = \frac{r_z E + R V_{Z0}}{r_z + R} \rightarrow \Delta V_s = \Delta E \frac{r_z}{r_z + R} = \pm 1 \frac{r_z}{r_z + R} = \pm 38.5mV$$

Lorsque la résistance R_L est traversée par 1mA, le courant dans La diode Zener diminue de 1mA, donc :

$$\Delta V_s = r_z \Delta I_z = 20 \times -1mA = -20mV$$

$$\Delta V_s / \Delta I_L = -20mV / mA$$



Quand la charge est de 2K, le courant qui la traverse est sensiblement égal à $6.8/2k$ soit 3.4mA.

$$\Delta V_s = r_z \Delta I_z = 20 \times -3.4mA = -68mV$$

Quand la charge est de 0.5K, le courant qui la traverse est sensiblement égal à $6.8/0.5k$, soit 13.6mA.

De plus on a :

$$I_z \approx \frac{10 - 6.8}{0.5k} - 13.6mA = 6.4mA - 13.6mA < 0$$

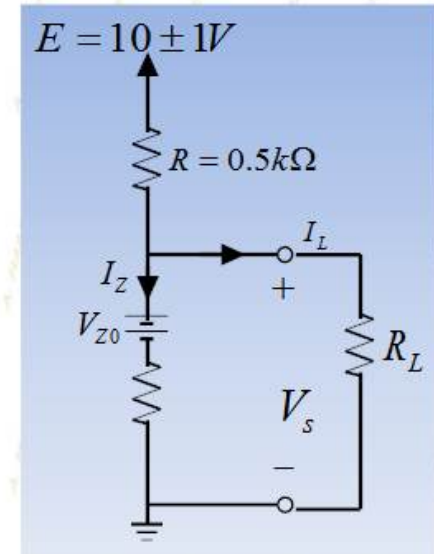
La diode est un **circuit ouvert**. On peut écrire :

$$V_s = \frac{R_L}{R_L + R} E = \frac{0.5k}{0.5k + 0.5k} 10 = 5V$$

Le courant de coude est $I_z \approx I_{zk} = 0.2mA \rightarrow V_{zk} \approx V_{z0} = 6.7V$

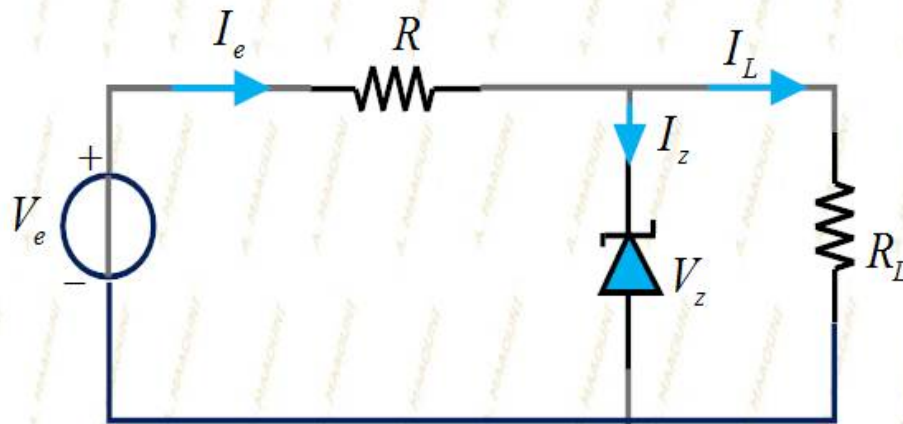
Dans le pire des cas, l'alimentation vaut 9V, le courant dans la charge est donc :

$$I_L \approx \frac{9 - 6.7}{0.5k} - 0.2mA = 4.4mA \mapsto R_L = \frac{6.7}{4.4} = 1.5k$$



Exemple 5

Déterminer la puissance nominale minimale de la diode Zener pour que le circuit fonctionne en régulateur si V_e varie entre 10V et 15V et R_L varie entre 1k et 10k .
Données : $V_z = 5V$, $R = 100\Omega$.



$$I_{Lmax} = \frac{V_Z}{R_{Lmin}} = \frac{5}{1k} = 5mA$$

$$I_{Lmin} = \frac{V_Z}{R_{Lmax}} = \frac{5}{10k} = 0.5mA$$

La puissance maximale dans la diode Zener est donnée par :

$$P_{Dmax} = V_Z I_{Zmax} = V_Z (I_{emax} - I_{Lmin})$$

Le courant d'entrée maximal s'écrit :

$$I_{emax} = \frac{V_{emax} - V_Z}{R} = \frac{15 - 5}{100} = 100mA$$

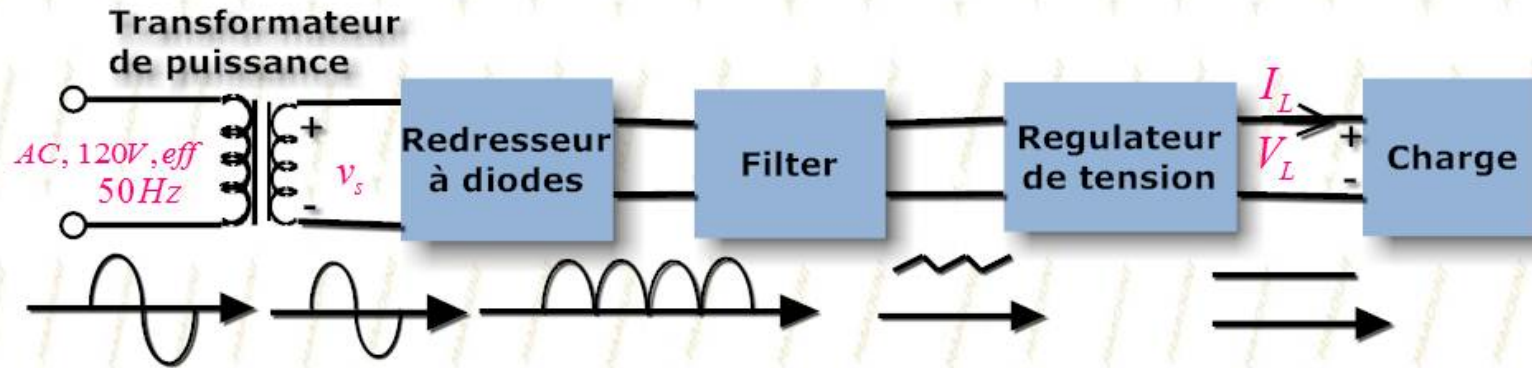
La puissance maximale a pour valeur :

$$P_{Dmax} = V_Z I_{Zmax} = 5(100mA - 0.5mA) = 497,5mW$$

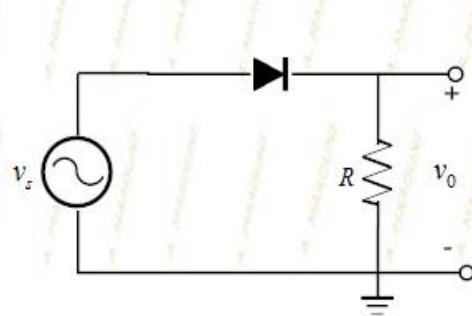
Pour que la diode fonctionne en régulateur, il faut que la puissance de La diode soit supérieur à 0.5W.

Redresseurs

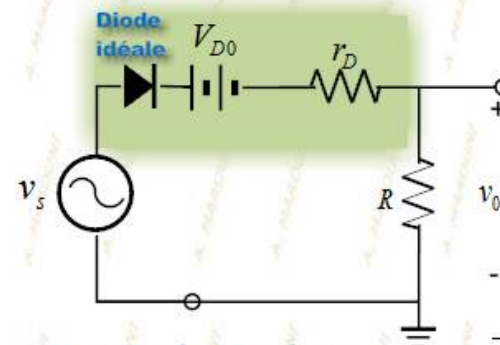
Les redresseurs sont des circuits qui permettent de transformer l'alternatif en DC. On distingue deux types de redresseurs : mono alternance et bi alternances. Le principe est décrit dans la figure suivante :



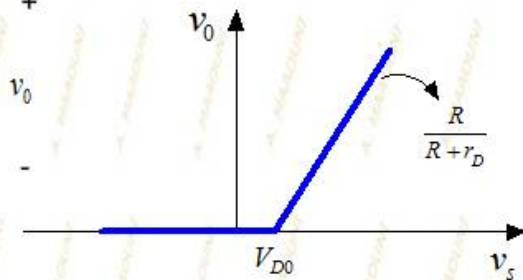
REDRESSEUR MONO ALTERNANCES



redresseur

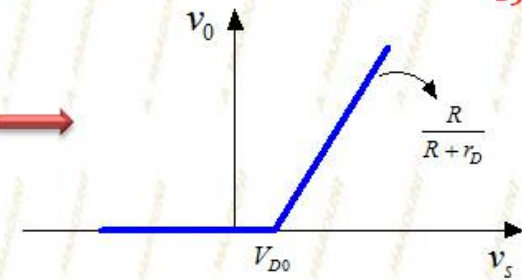


Circuit équivalent

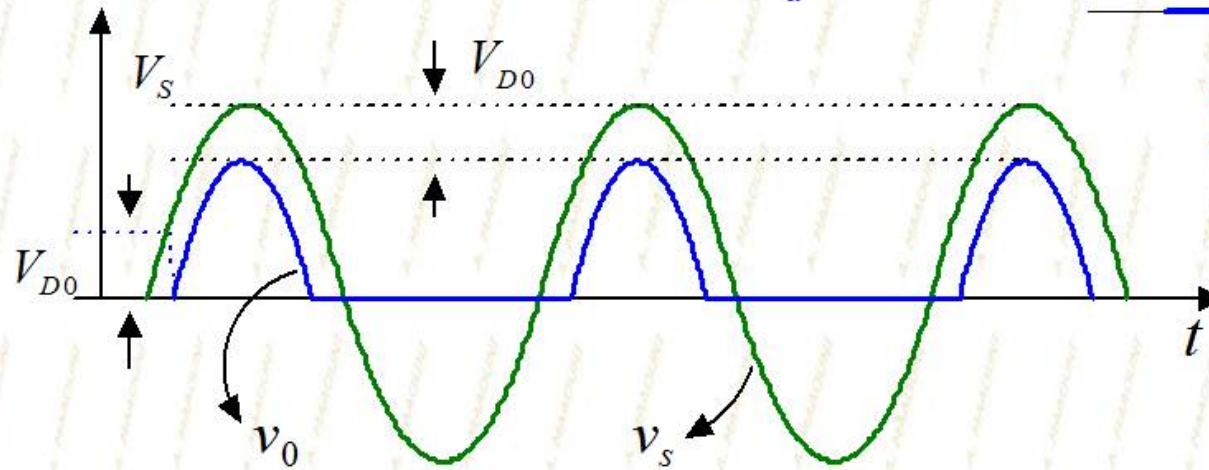


Si $v_s < V_{D0}$, la diode est bloquée et $v_0 = 0$

Si $v_s > V_{D0}$, la diode conduit et $v_0 = \frac{R}{R+r_d}(v_s - V_{D0})$



Caractéristique de transfert



PIV (Peak Inverse Voltage) : plus grande valeur de la tension inverse soumise à la diode sans atteindre la zone de claquage.

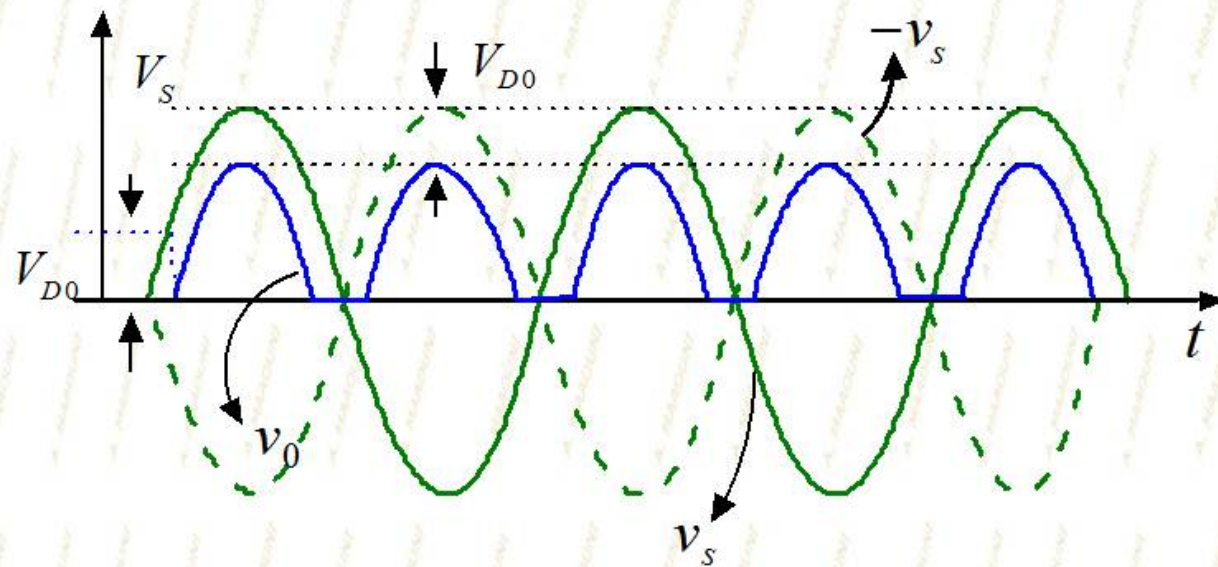
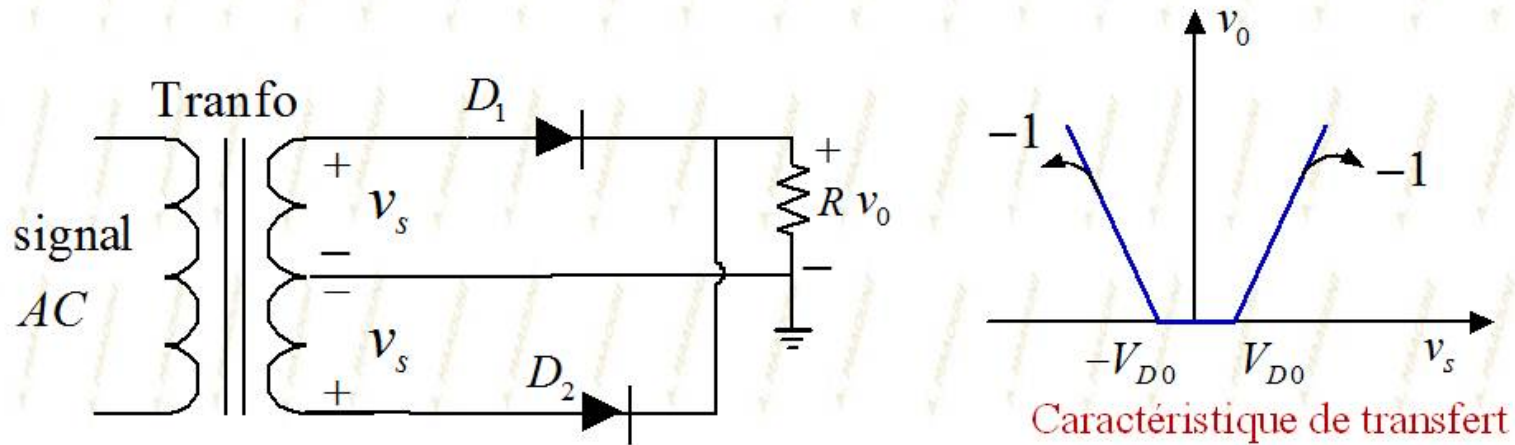
Pour le redresseur mono alternance :

$$PIV = V_s$$

Remarque

La diode utilisée doit avoir une tension de claquage (de coude) au moins 50% plus grande que le PIV

REDRESSEUR DOUBLE ALTERNANCES



PIV

Pendant l'alternance positive, la diode D1 conduit (si $v_s > V_{D0}$) et la diode D2 est bloquée.

$$v_{K2} = v_0 \quad \text{et} \quad v_{A2} = -v_s$$

Soit :

$$v_{KA2} = v_0 + v_s \quad \text{Tension inverse aux bornes de D2}$$

Cette tension inverse atteint son max quand :

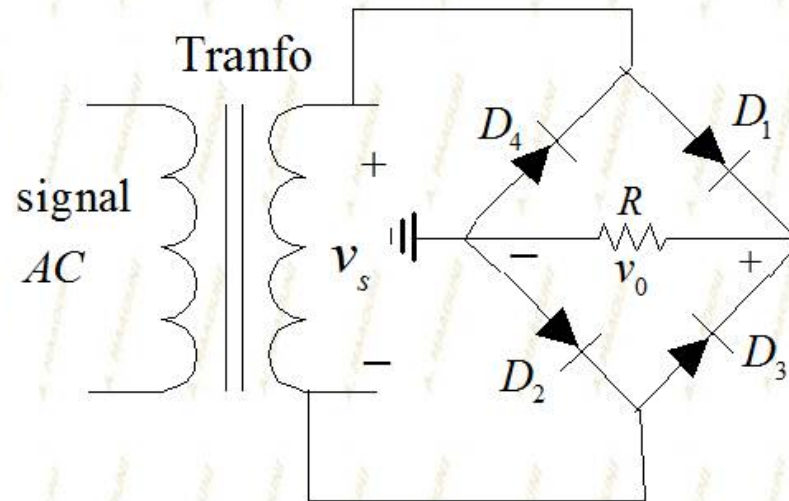
$$v_0 = V_s - V_{D0}, \quad v_s = V_s$$

PIV est donc :

$$PIV = 2V_s - V_{D0}$$

PIV est approximativement le double de celui du redresseur mono alternance

PONT REDRESSEUR



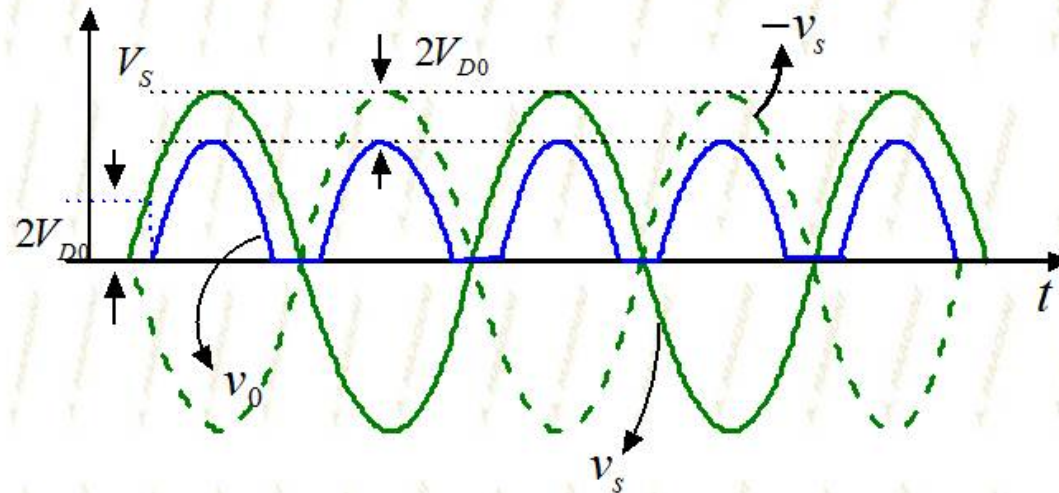
Alternance positive

D1 & D2 conduisent
Les autres bloquées.

Alternance négative

D3 & D4 conduisent
Les autres bloquées.

PIV



$$PIV = v_{KA3} (pic)$$

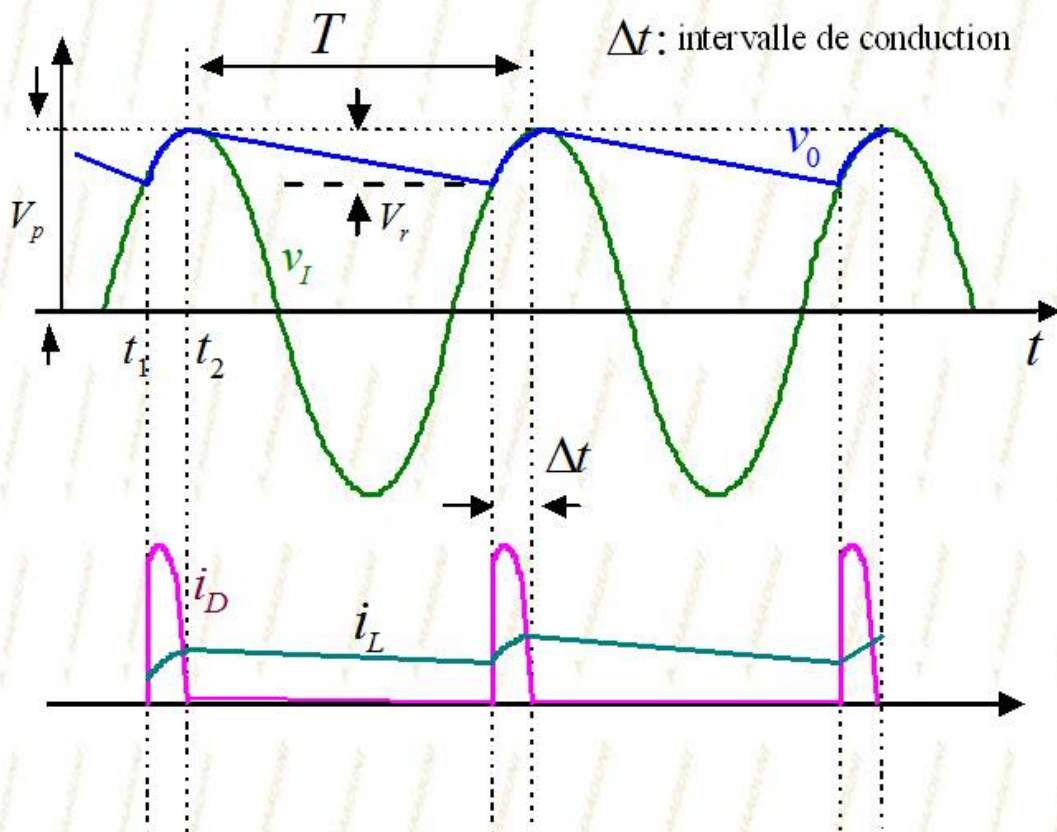
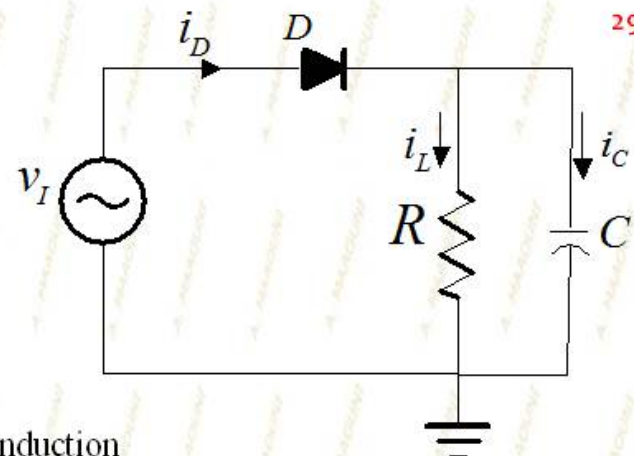
$$\begin{aligned} & \underbrace{V_D}_{V_D} + \underbrace{V_s - 2V_D}_{V_s - 2V_D} \\ &= v_2 + v_0 \\ &= V_s - V_D \end{aligned}$$

FILTRAGE CAPACITIF

A. MONO ALTERNANCE

Hypothèse: $\tau = RC \gg T$

$$i_D = C \frac{dv_I}{dt} + i_L, \quad i_L = \frac{v_0}{R}$$



Alternance positive :

La diode (supposée idéale) conduit et la capacité se charge avec : $v_0 = v_I$

Lorsque la charge est maximale, la tension aux bornes du condensateur vaut :

$$v_0 = V_p$$

La diode se bloque, puisque :

$$v_D = v_I - V_p < 0$$

La capacité se décharge à travers la résistance selon la formule :

$$v_0(t) = V_p e^{-\frac{(t-t_2)}{\tau}}$$

À l'instant $t_2 + T - \Delta t$, la tension aux bornes de la capacité vaut :

$$v_0(t_2 + T - \Delta t) = V_p - V_r \rightarrow V_r = V_p - v_0(t_2 + T - \Delta t)$$

$$V_r = V_p - V_p e^{-\frac{(T-\Delta t)}{\tau}} \approx V_p - V_p e^{-\frac{T}{\tau}} \approx V_p - V_p \overbrace{\left(1 - \frac{T}{\tau}\right)}^{\exp(-T/\tau), \tau \gg T}$$

$$V_r \approx \frac{V_p T}{\tau} = \frac{V_p}{f\tau}, \quad V_r = \frac{I_L}{fC} \quad \text{où} \quad I_L = \frac{V_p}{R}$$

Intervalle de conduction Δt

$$V_p \cos(\omega \Delta t) = V_p - V_r \approx V_p \left(1 - \frac{\omega^2 \Delta t^2}{2} \right)$$

$$\omega \Delta t \approx \sqrt{\frac{2V_r}{V_p}}$$

Angle de conduction

Courant moyen dans la diode

Ce courant peut être calculé en tenant compte du fait que :

La charge accumulée dans C pendant la conduction de D est perdue pendant la décharge dans la résistance.

$$Q_{\text{accumulée}} = i_{C\text{moy}} \Delta t = Q_{\text{perdue}} = V_r C$$

$$i_{C\text{moy}} = i_{D\text{moy}} - I_L \rightarrow I_{D\text{moy}} = I_L + \frac{V_r C}{\Delta t}$$

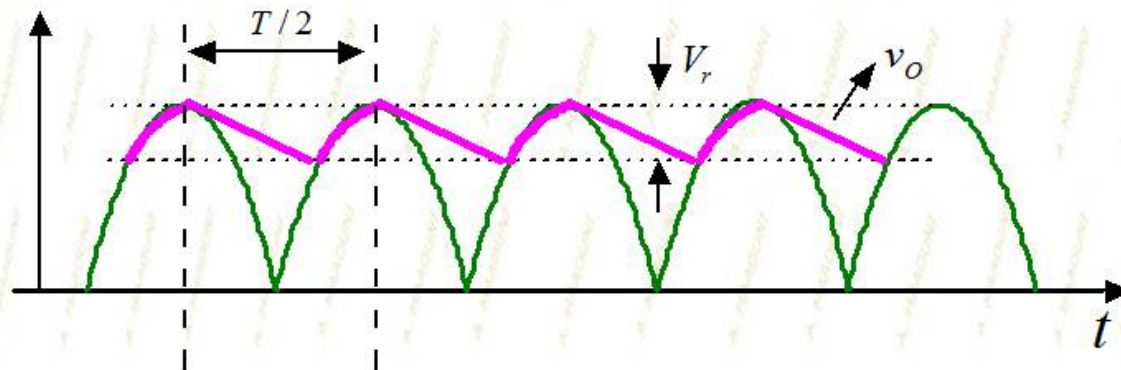
$$i_{C\text{moy}} = i_{D\text{moy}} - I_L \rightarrow I_{D\text{moy}} = I_L \left(1 + \pi \sqrt{\frac{2V_p}{V_r}} \right)$$

$$i_D = C \frac{dv_I}{dt} + I_L, \quad I_L = \frac{V_p}{R}, \quad V_r \ll V_p$$

$$I_{D\max} \approx C \omega V_p \omega \Delta t + I_L, \quad I_L = \frac{V_p}{R}, \quad V_r \ll V_p$$

$$I_{D\max} \approx I_L \left(1 + \pi \sqrt{\frac{2V_p}{V_r}} \right)$$

B. BI ALTERNANCE

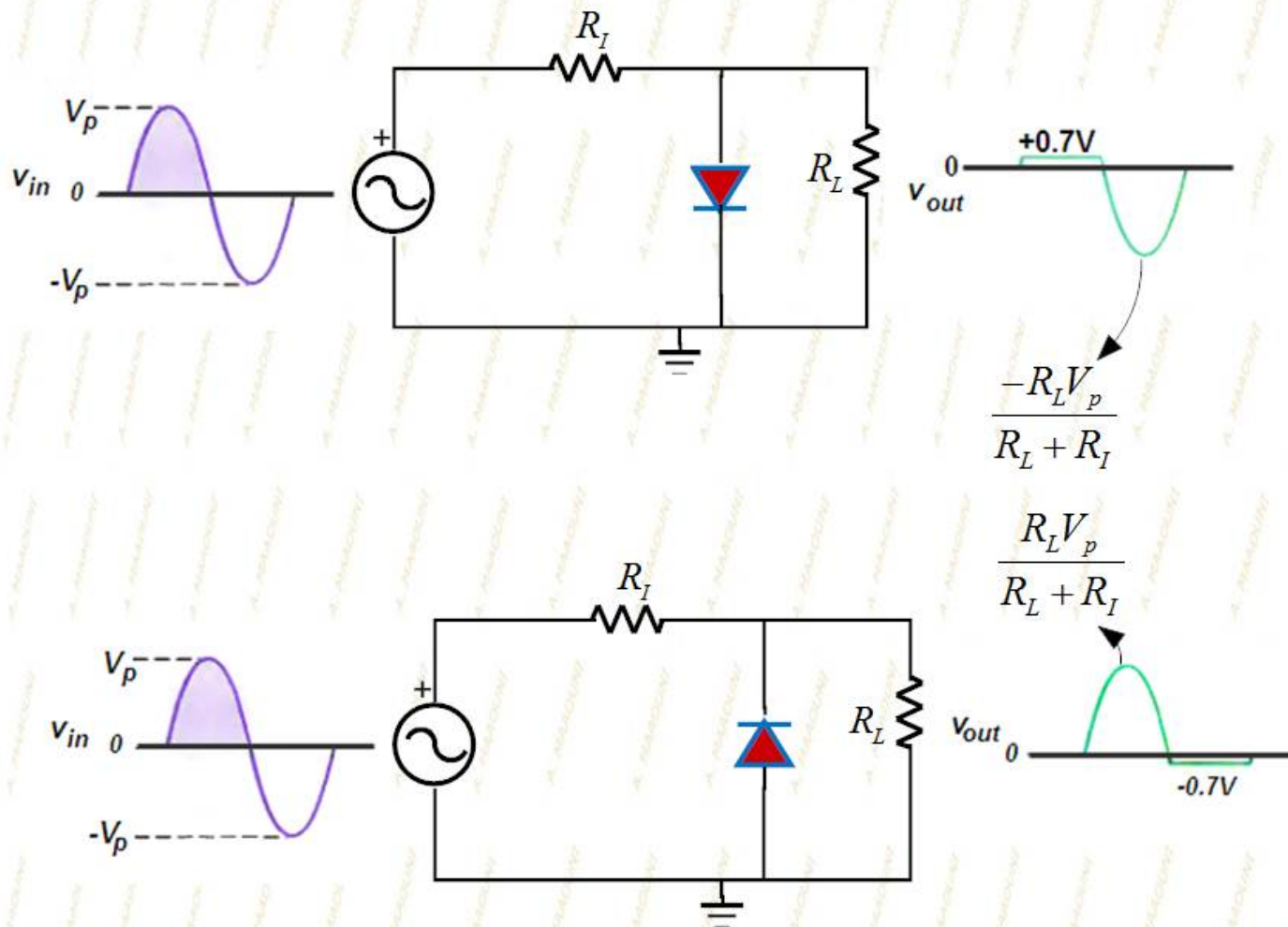


$$V_r \approx \frac{V_p}{2f\tau}$$

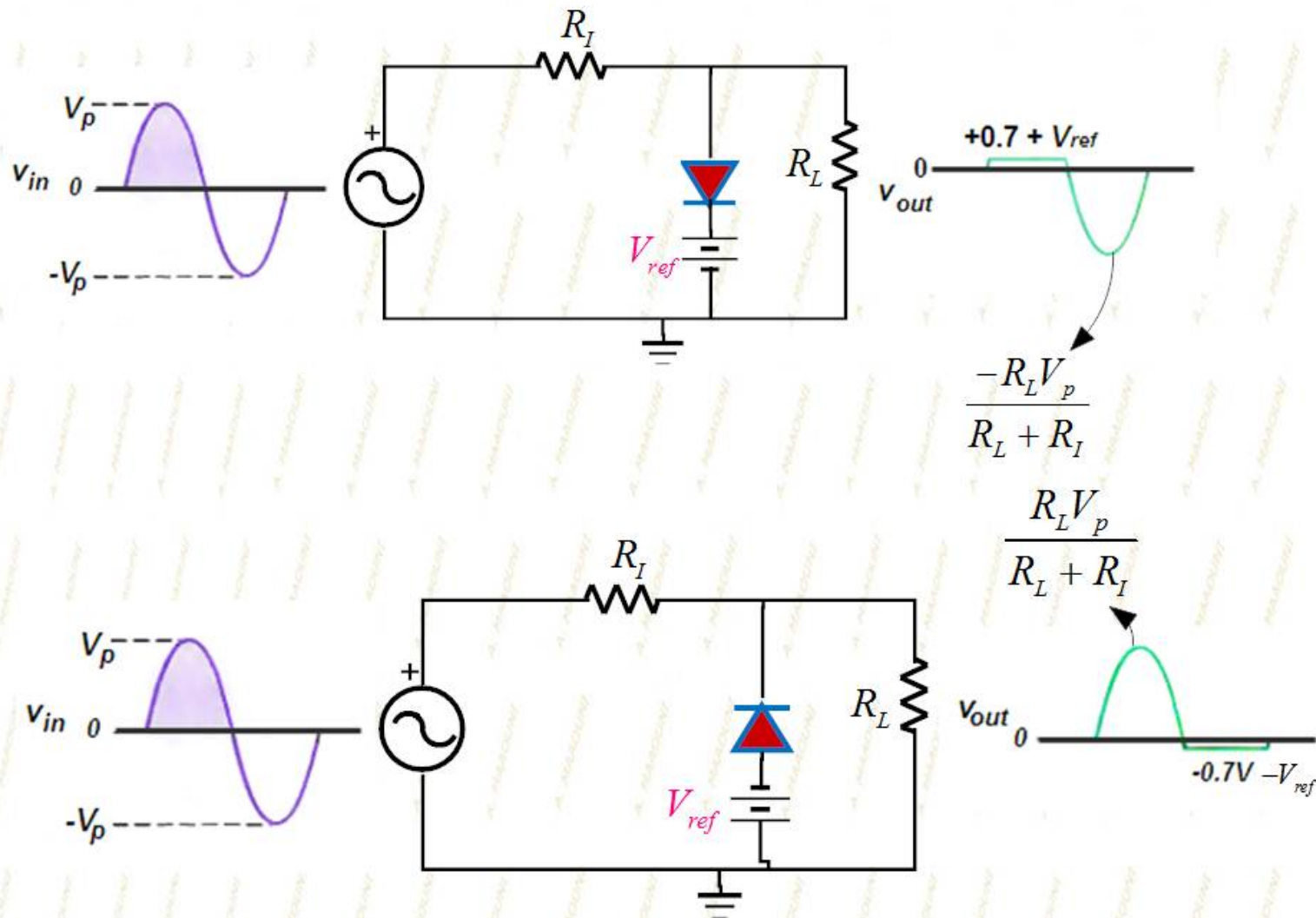
$$I_{D\text{moy}} = I_L \left(1 + \pi \sqrt{\frac{V_p}{2V_r}} \right), \quad I_{D\max} \approx I_L \left(1 + 2\pi \sqrt{\frac{V_p}{2V_r}} \right)$$

Circuits limiteurs (à diodes)

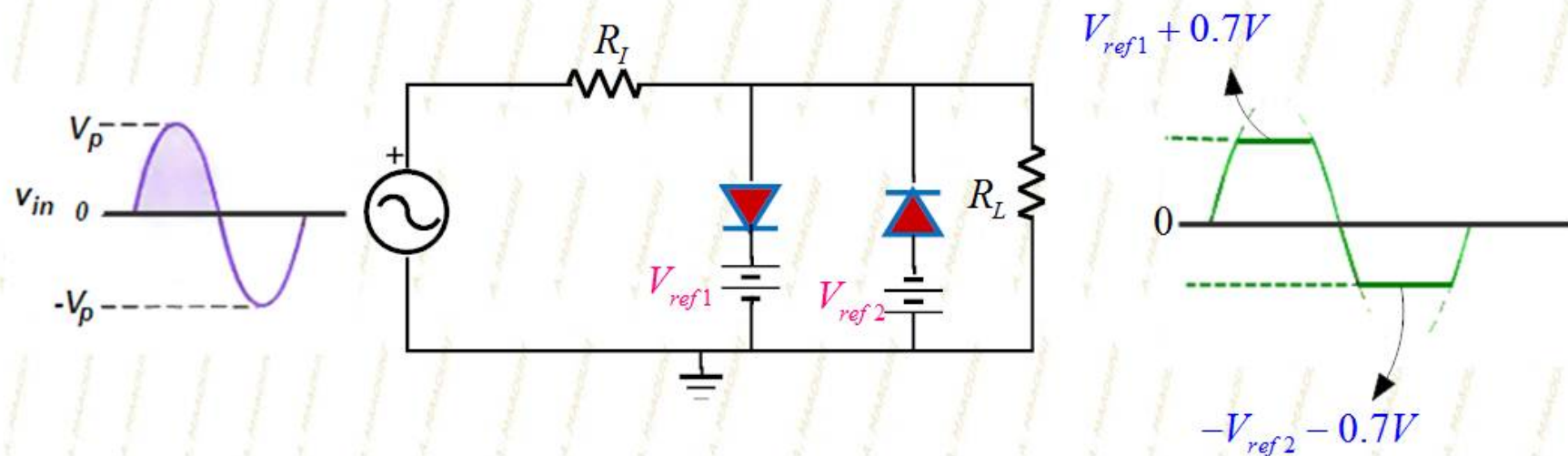
Ils permettent de limiter à un certain niveau la tension/ courant d'entrée

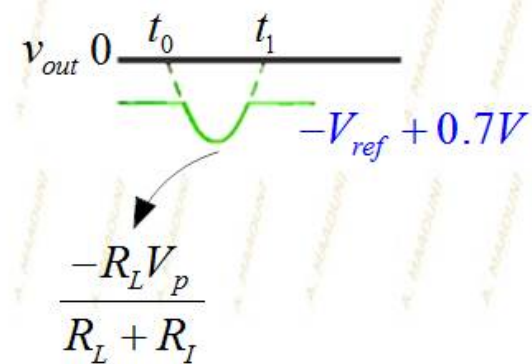
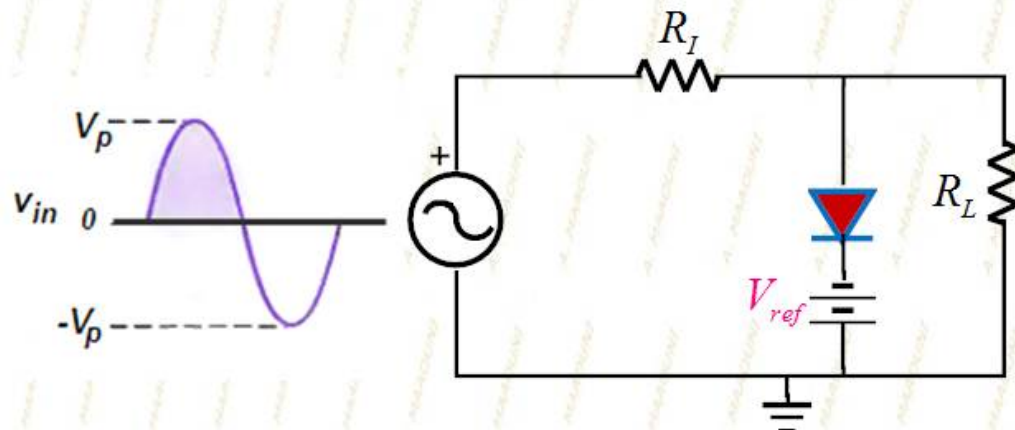
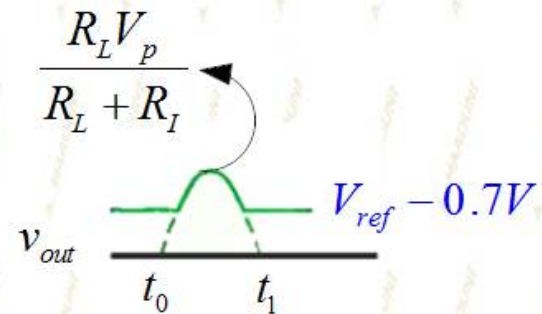
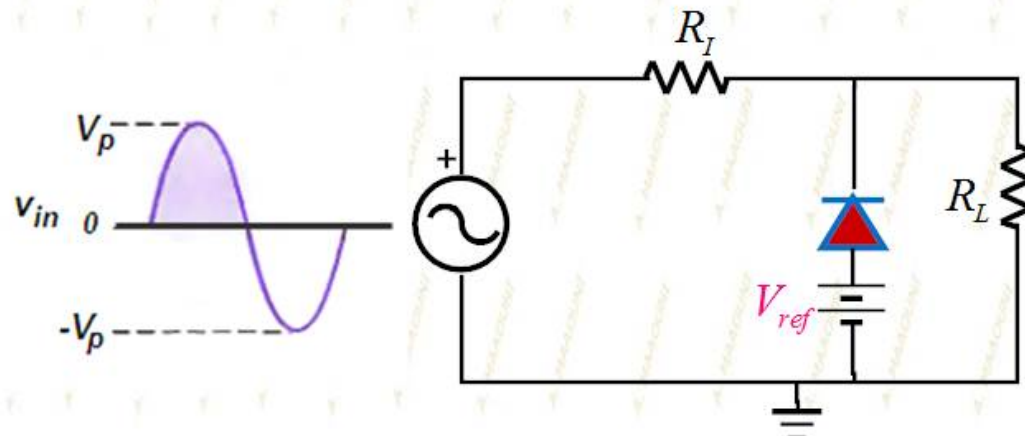


La tension d'écrêtage peut être ajustée par une tension de référence :

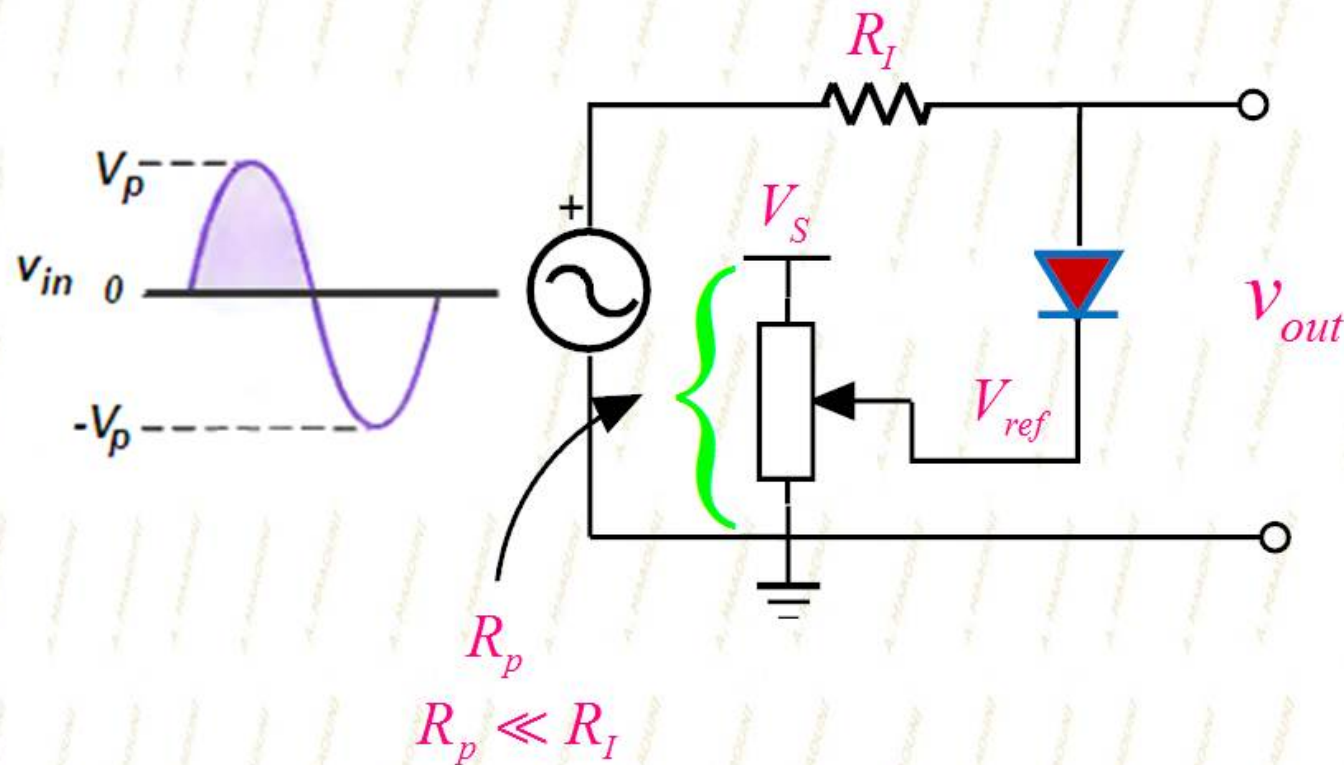


En combinant les deux structures précédentes, nous obtenons le circuit d'écrtage des deux alternances du signal d'entrée :

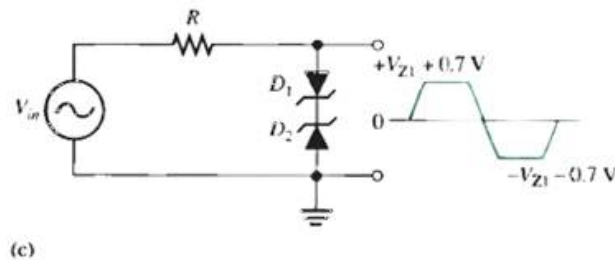
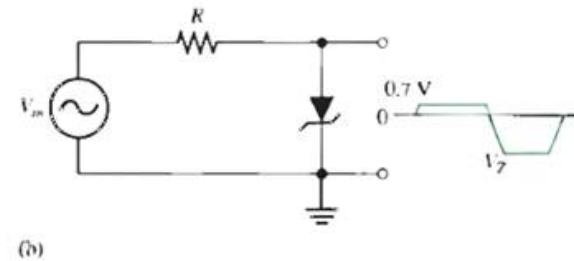
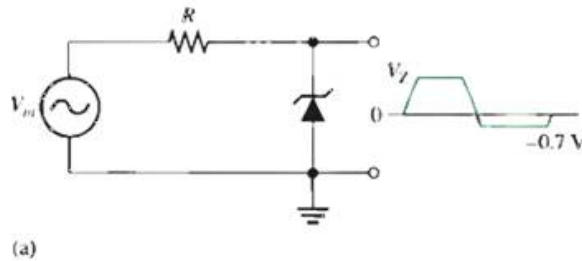
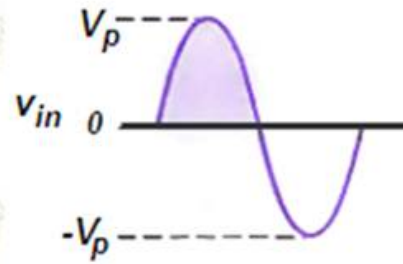




Pour assurer une tension de référence V_{ref} variable, on peut placer un potentiomètre comme l'indique le montage suivant :



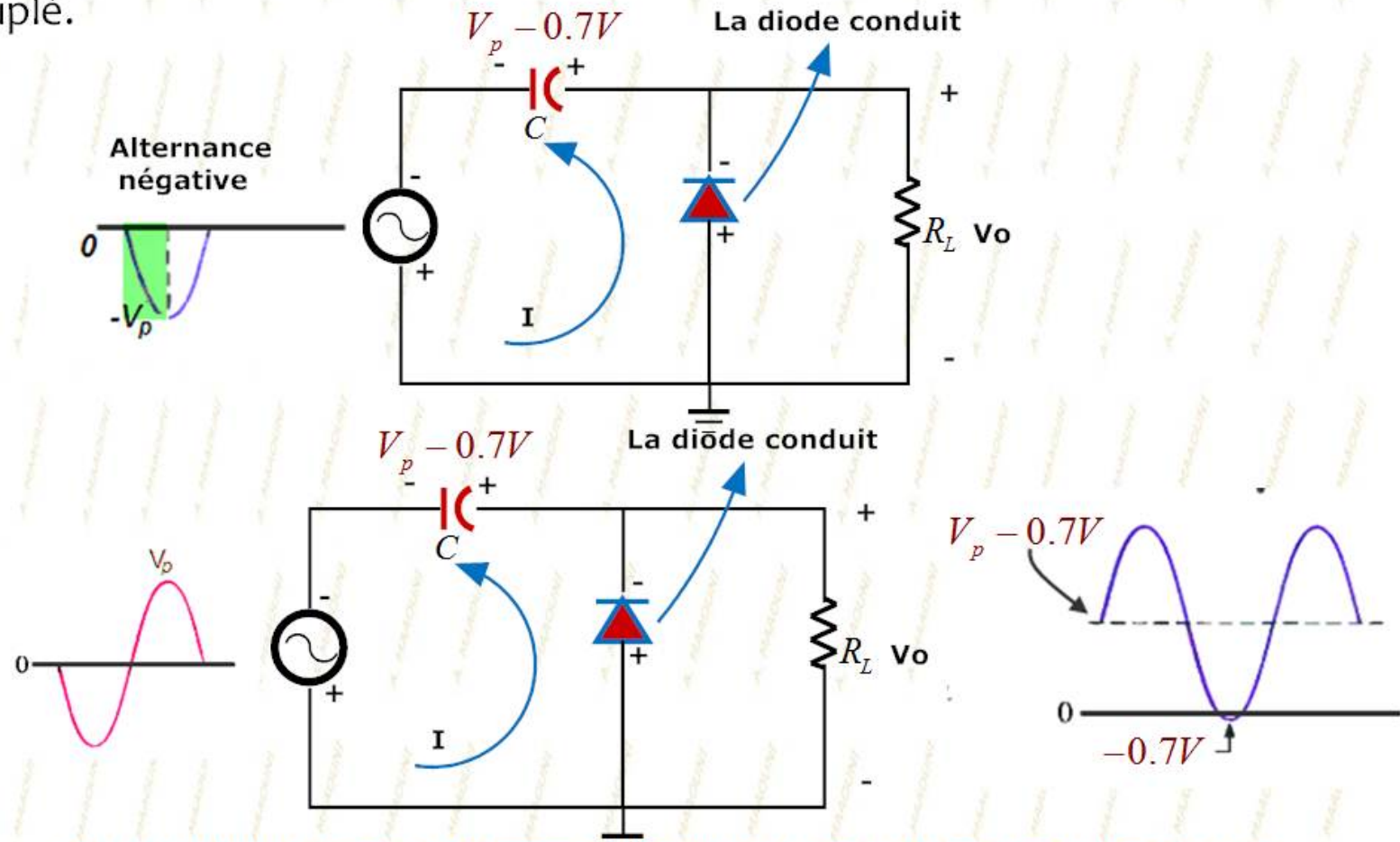
Limiteurs à diodes Zener



'Circuits DC-restaurateurs (à diodes) 'Clamper circuits'

Ils permettent d'ajouter une tension continue (composante DC) à un signal AC.

Ils sont souvent utilisés dans les récepteurs TV en tant que restaurateurs de composantes DC éliminées lors d'un traitement du signal vidéo par amplificateur couplé.



'Multiplieurs de tension'

Doubleur de tension

