

## Chapitre 3 : La Diode

### 3.1. Définition, symbole et caractéristique :

La diode est un composant non linéaire (relation entre le courant et la tension est donnée par une équation non linéaire). La représentation symbolique de la diode est donnée en figure 3.1.

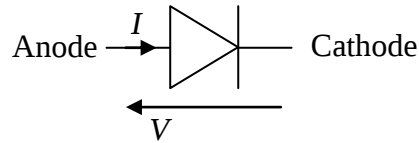


Fig.3.1 : Représentation symbolique de la diode

La caractéristique courant-tension (I-V) de la diode est donnée par :  $I = I_s \left( e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right)$

Avec :

$I_s$  : Courant de saturation de la diode

$n$  : Coefficient d'idéalité de la diode ( $1 \leq n \leq 2$ )

$V_T$  : Tension thermique,  $V_T = \frac{kT}{q}$

$k$  : Constante de Boltzmann,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

$T$  : Température

$q$  : Charge de l'électron,  $q = 1.60219 \times 10^{-19} \text{ C}$

En **polarisation inverse** ( $V < 0$ ), le courant qui parcourt la diode de la cathode vers l'anode est négligeable ( $I_s \approx 0$ ). En **polarisation directe** ( $V > 0$ ), le courant croît rapidement avec la tension comme il est montré dans la figure 3.2.

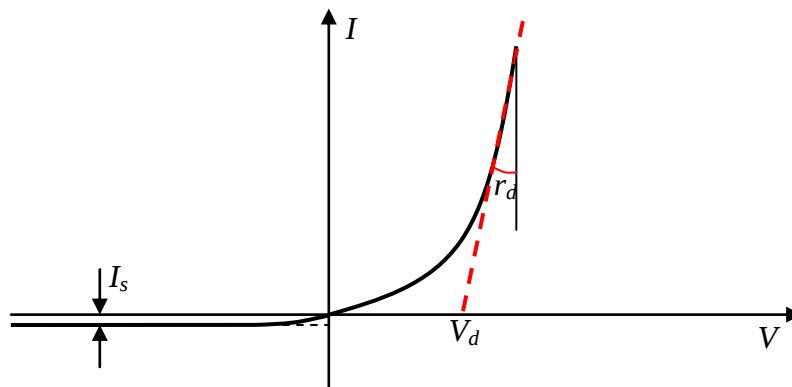


Fig.3.2 : Caractéristique I-V d'une diode

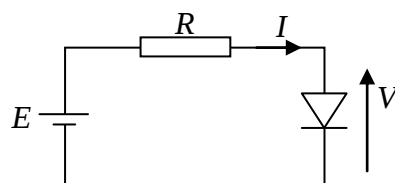
$V_d$  est la **tension de seuil** de la diode. Généralement, elle est inférieure à 1 V.

$r_d$  est la **résistance dynamique** de la diode. Elle est donnée par:  $r_d = \left( \frac{dI}{dV} \right)^{-1}$ . Lorsque  $V > V_d \gg V_T$ , la résistance dynamique peut être approximée par la formule:  $r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I}$

L'analyse d'un circuit électrique comportant des diodes est difficile, parce que le système d'équations décrivant le circuit est non linéaire.

#### Exemple :

Soit le circuit à diode suivant. Déterminez la tension  $V$  aux bornes de la diode.



En appliquant la loi des mailles :  $E - RI - V = 0$

Or le courant  $I$  est donné par :  $I = I_s \left( e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right)$

Donc :  $E - RI_s \left( e^{\frac{V}{nV_T}} - 1 \right) - V = 0$ ,

L'équation ci-dessus est une **équation non linéaire** qui ne peut pas être résolue analytiquement.

### 3.2. Modèles électriques linéaires de la diode :

La diode est un élément non linéaire, or l'analyse d'un circuit à comportement non linéaire est assez difficile. On remplace donc la diode par des modèles linéaires.

#### 3.2.1. Modèle idéal ( $r_d=0$ et $V_d=0$ ) :

Il s'agit d'un interrupteur fermé en polarisation directe,  $V>0$ , et ouvert en polarisation inverse,  $V\leq 0$ . La figure 3.3 montre ce modèle idéal.

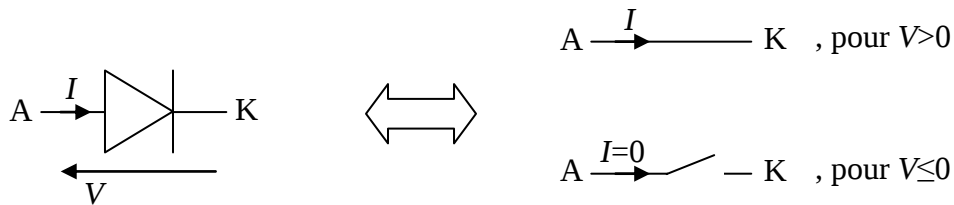
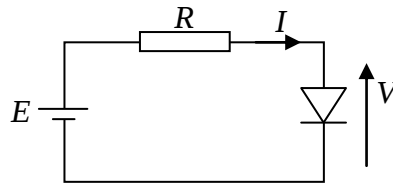


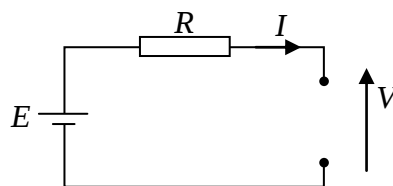
Fig.3.3: Modèle d'une diode idéale (première approximation).

#### Exemple 1:

Déterminez la tension  $V$  et le courant  $I$  en utilisant le modèle de la diode idéale.

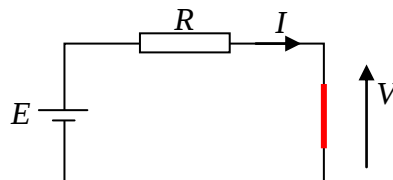


On débranche la diode ( $I=0$ ) et on calcule la tension de Thévenin à ces bornes.



$$V = E - RI = E > 0$$

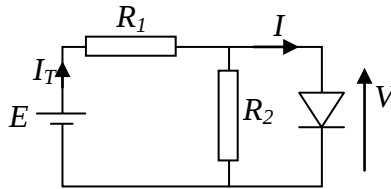
$V > 0 \Rightarrow$  La diode est passante. On remplace la diode par un interrupteur fermé.



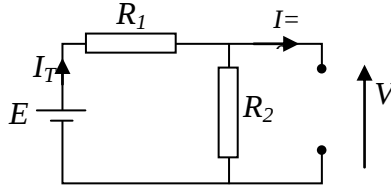
Donc :  $V=0$  et  $I = \frac{E}{R}$

#### Exemple 2:

Déterminez la tension  $V$  et le courant  $I_T$ .

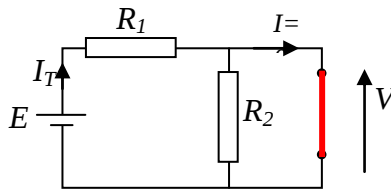


On détermine  $V$  lorsque la diode est enlevée du circuit ( $I=0$ ).



$$\Rightarrow V = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E > 0$$

$V > 0 \Rightarrow$  la diode est passante.



$$\Rightarrow V = 0$$

$$\Rightarrow E - R_1 I_T - V = 0 \Rightarrow I_T = \frac{E}{R_1} = I$$

### 3.2.2. Modèle diode parfaite (deuxième approximation) :

Dans ce modèle, le courant est nul pour des tensions inférieures à la tension de seuil  $V_d$  ( $V < V_d$ ). A cette valeur, la diode conduit et la tension à ces bornes reste constante quelque soit le courant qui la traverse (Fig3.4).

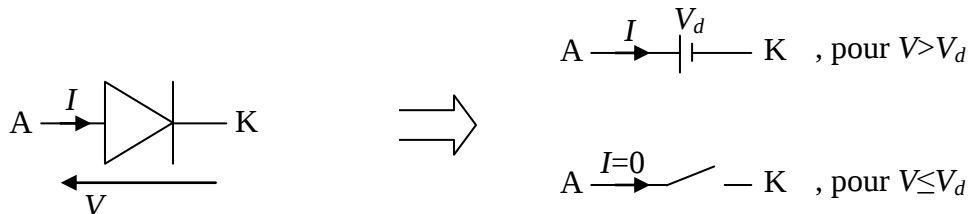
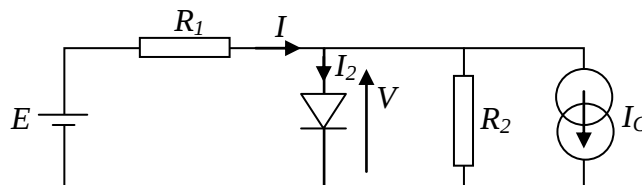


Fig.3.4: Modèle diode parfaite (deuxième approximation).

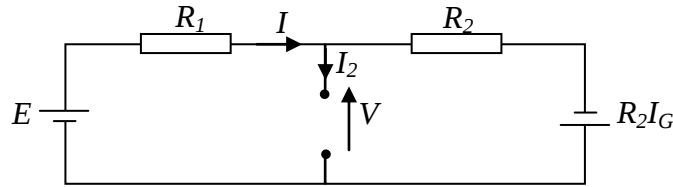
#### Exemple:

Déterminez la tension  $V$  et le courant  $I$ .



On commence par déterminer la tension anode-cathode  $V$  de la diode lorsque celle-ci est déconnectée  $\Rightarrow I_2 = 0$ .

La source de courant  $I_G$  avec la résistance  $R_2$  peuvent être remplacées par une source de tension  $R_2 I_G$  en série avec  $R_2$ .

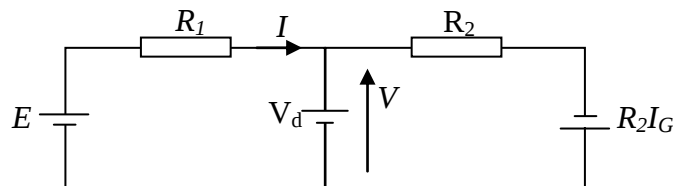


En utilisant le théorème de superposition ou bien le théorème de Millmann, nous obtiendrons:

$$V = \frac{R_2 E - R_1 R_2 I_G}{R_1 + R_2}$$

On distingue deux cas:

- Premier cas :  $V \leq V_d \Rightarrow \frac{R_2 E - R_1 R_2 I_G}{R_1 + R_2} < V_d \Rightarrow$  la diode est bloquée (interrupteur ouvert) .  
Donc :  $V = \frac{R_2 E - R_1 R_2 I_G}{R_1 + R_2}$  et  $I = \frac{E + R_2 I_G}{R_1 + R_2}$
- Deuxième cas :  $V > V_d \Rightarrow \frac{R_2 E - R_1 R_2 I_G}{R_1 + R_2} > V_d \Rightarrow$  la diode conduit et on la remplace par une source  $V_d$ :



Donc ce cas on a:  $V = V_d$  et  $I = \frac{E - V_d}{R_1}$

### 3.2.3. Modèle diode réelle (troisième approximation) :

Dans ce modèle, la résistance dynamique  $r_d$  est incluse (Fig3.5).

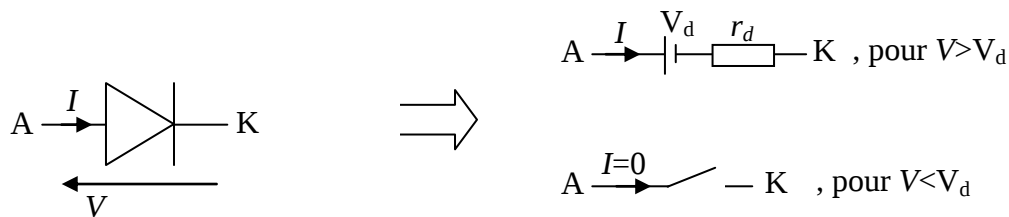
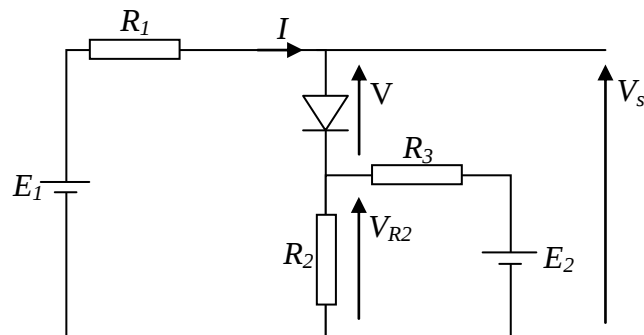


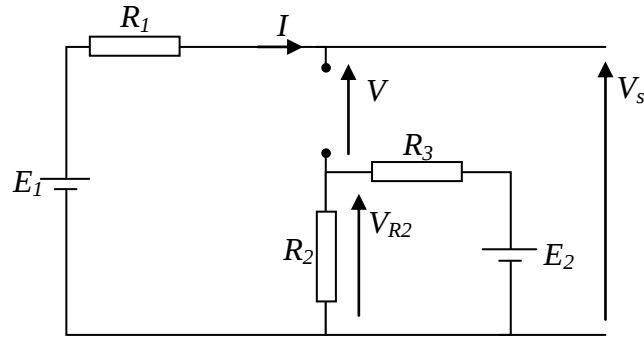
Fig.3.5: Modèle d'une diode réelle (troisième approximation).

#### Exemple :

Déterminez la tension  $V_s$ .



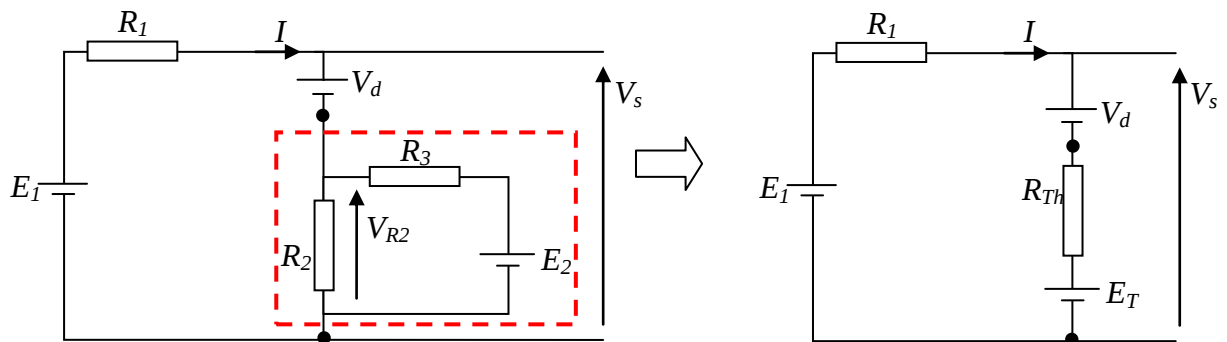
On débranche la diode et on calcul la tension à ses bornes.



$$V = E_1 - R_1 I - V_{R2} = E_1 - V_{R2}$$

$$= E_1 - \frac{R_2}{R_2 + R_3} E_2 ; \text{ parce que } R_2 \text{ et } R_3 \text{ sont en série.}$$

- Premier cas : la diode est bloquée ( $V \leq V_d$ )  
 $V_s = E_1 - R_1 I = E_1$  ; car  $I=0$ .
- Deuxième cas : la diode est passante ( $V > V_d$ )



$$V_s = E_{Th} + V_d + V_{R_{Th}}$$

$$V_{R_{Th}} = \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_1} (E_1 - E_{Th} - V_d)$$

$$\Rightarrow V_s = E_{Th} + V_d + \frac{R_{Th}}{R_{Th} + R_1} (E_1 - E_{Th} - V_d)$$

$$\Rightarrow V_s = \frac{R_1(E_{Th} + V_d) + R_{Th}E_1}{R_{Th} + R_1}$$

Avec :  $E_{Th} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} E_2$  et  $R_{Th} = R_2 // R_3$

### 3.3. Circuits à diodes

#### 3.3.1. Redressement simple et double alternance:

La plupart des circuits électroniques ont besoin d'une tension continue pour fonctionner. Puisque la tension de réseau électrique est alternative (AC), on la transforme en une tension continue (DC) par un montage appelé alimentation. Le premier étage de cette alimentation est le redresseur.

##### 3.3.1.1. Redresseur simple alternance :

Il admet l'alternance positive et annule l'alternance négative. Une simple diode en série avec la charge suffit à réaliser cette fonction.

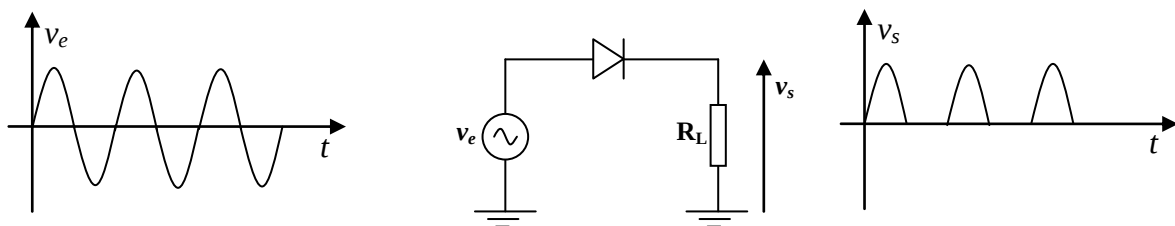
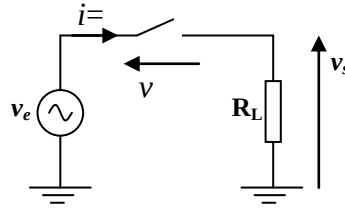


Fig.3.6. Redresseur simple alternance à diode.

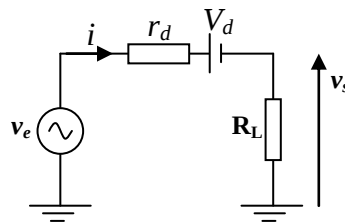
- Pour simplifier l'analyse du circuit, on commence par débrancher la diode et calculer sa tension  $V = V_{AK}$ .



$$v_e - V - R_L i = 0 \text{ et } i = 0$$

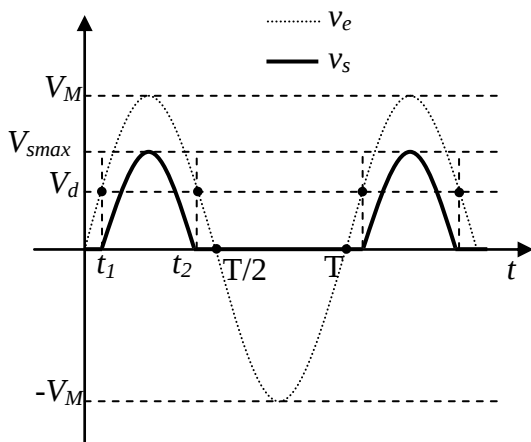
$$\Rightarrow V = v_e$$

- On compare la tension  $V$  par la tension de seuil  $V_d$  :
  - $V = v_e \leq V_d$  :  
La diode est bloquée  $\Rightarrow v_s = R_L i \Rightarrow v_s = 0$
  - $V = v_e > V_d$  :  
La diode conduit et est remplacée par son modèle linéaire ( $r_d, V_d$ ).



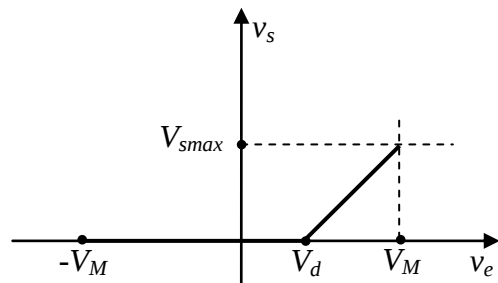
$$v_s = \frac{R_L}{R_L + r_d} (v_e - V_d), \text{ diviseur de tension.}$$

Tracés de  $v_s(t)$  et  $v_e(t)$



$$v_{smax} = \frac{R_L}{R_L + r_d} (V_M - V_d)$$

Caractéristique de transfert  $v_s = f(v_e)$



### 3.3.1.2. Redresseur double alternance: Le montage en pont de Graëtz

Lors de l'alternance positive de la tension d'entrée  $v_e$ , seules les diodes  $D_1$  et  $D_3$ , ayant une tension d'anode supérieure à  $V_d$ , conduiront. Les diodes  $D_2$  et  $D_4$  sont bloquées. Pour l'alternance négative, ce sont les diodes  $D_2$  et  $D_4$  qui conduisent (Fig.3.7).

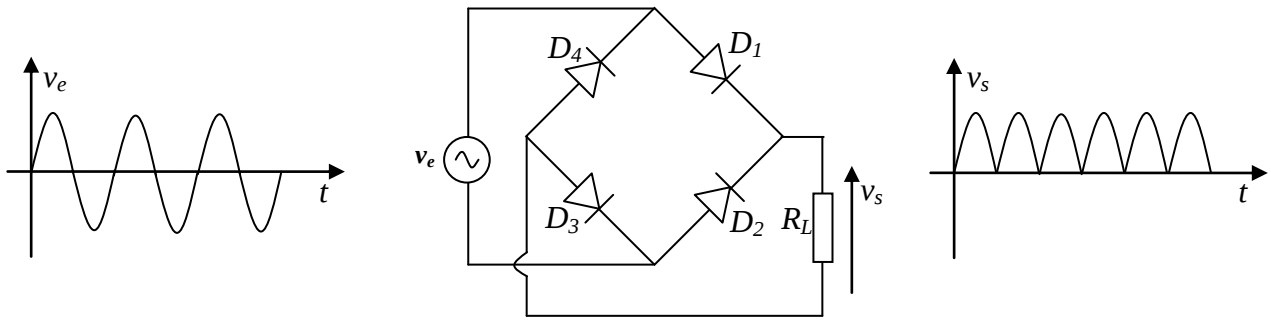
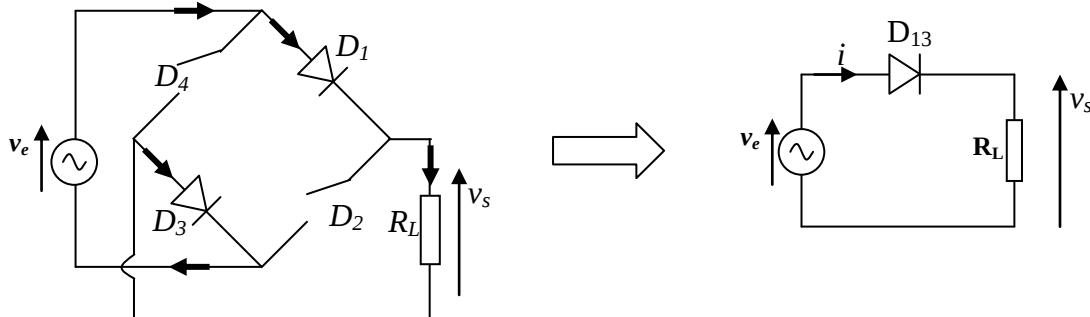


Fig.3.7. Redresseur double alternance à 4 diodes.

- Lors de l'alternance positive ( $v_e \geq 0$ ) de la tension d'entrée, les diodes  $D_2$  et  $D_4$  se bloquent et le circuit se simplifie comme représenté à la figure ci-dessous.

L'analyse est la même comme pour le redressement simple alternance, ce qui donne :

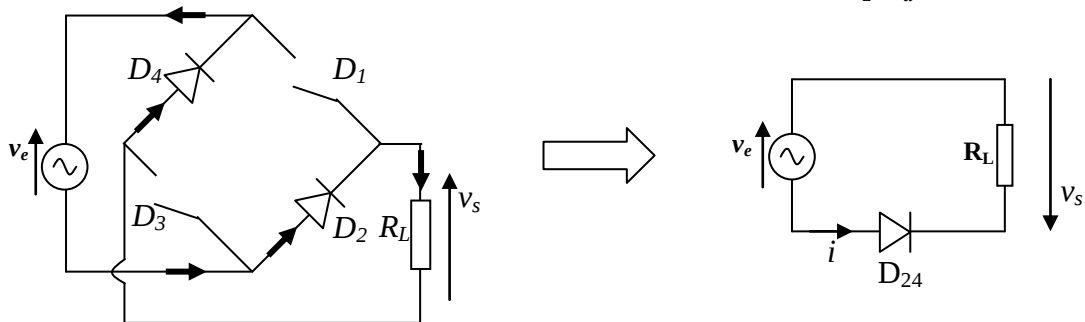
- $0 \leq v_e \leq 2V_d$  : les diodes  $D_1$  et  $D_3$  ( $D_{13}$ ) sont bloquées  $\Rightarrow v_s = 0$
- $v_e > 2V_d$  : les diodes  $D_1$  et  $D_3$  ( $D_{13}$ ) conduisent  $\Rightarrow v_s = \frac{R_L}{R_L + r_d} (v_e - 2V_d)$

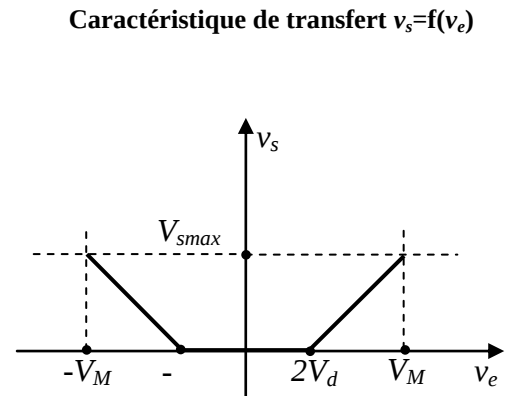
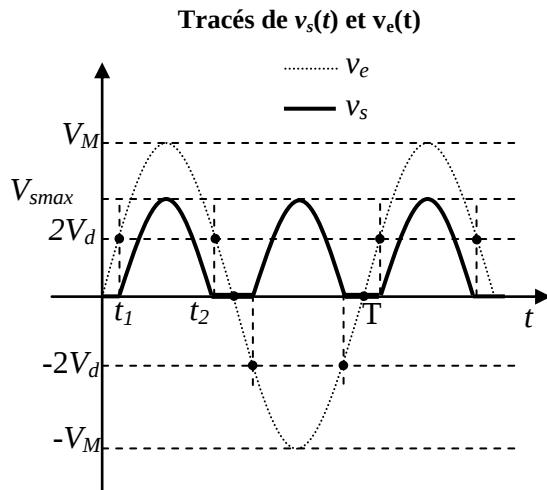


- Lors de l'alternance négative ( $v_e \leq 0$ ) de la tension d'entrée, les diodes  $D_1$  et  $D_3$  se bloquent et le circuit se simplifie comme représenté à la figure ci-dessous.

L'analyse est aussi la même comme pour le redressement simple alternance, ce qui donne :

- $-2V_d \leq v_e \leq 0$  : les diodes  $D_2$  et  $D_4$  ( $D_{24}$ ) sont bloquées  $\Rightarrow v_s = 0$
- $v_e < -2V_d$  : les diodes  $D_2$  et  $D_4$  ( $D_{24}$ ) conduisent  $\Rightarrow v_s = -\frac{R_L}{R_L + r_d} (v_e + 2V_d)$





### 3.3.1.3. Valeur moyenne et valeur efficace de la tension de sortie :

*Valeur moyenne* : la valeur moyenne d'une fonction périodique est donnée par

$$\langle v_s \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_s(t) dt$$

*Valeur efficace* : la valeur efficace d'une fonction périodique est donnée par

$$v_{s(efficace)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_s^2(t) dt}$$

- Redressement simple alternance :  
 si  $r_d=0$  et  $V_d=0$  alors :  $\langle v_s \rangle = \frac{V_M}{\pi}$   
 si  $r_d=0$  et  $V_d=0$  alors :  $v_{s(efficace)} = \frac{V_M}{2}$
- Redressement double alternance :  
 si  $r_d=0$  et  $V_d=0$  alors :  $\langle v_s \rangle = 2 \frac{V_M}{\pi}$   
 si  $r_d=0$  et  $V_d=0$  alors :  $v_{s(efficace)} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$

### 3.3.1.4. Redressement et filtrage :

Une tension redressée (simple ou double alternance) a toujours le même signe mais elle n'est pas continue puisqu'elle varie de 0 à la valeur de crête. Pour obtenir une tension continue, il reste une étape: le filtrage. Un condensateur est placé en dérivation à la sortie du pont de redressement (Fig.3.8).

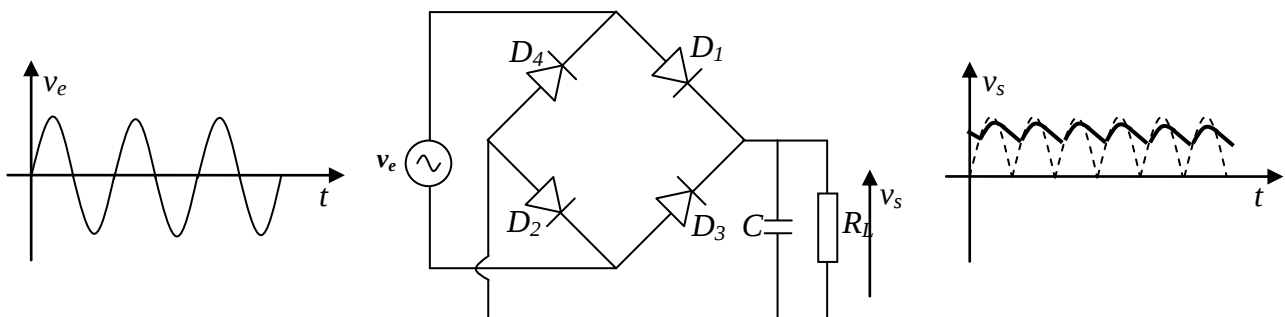


Fig.3.8. Redresseur double alternance avec capacité de filtrage.

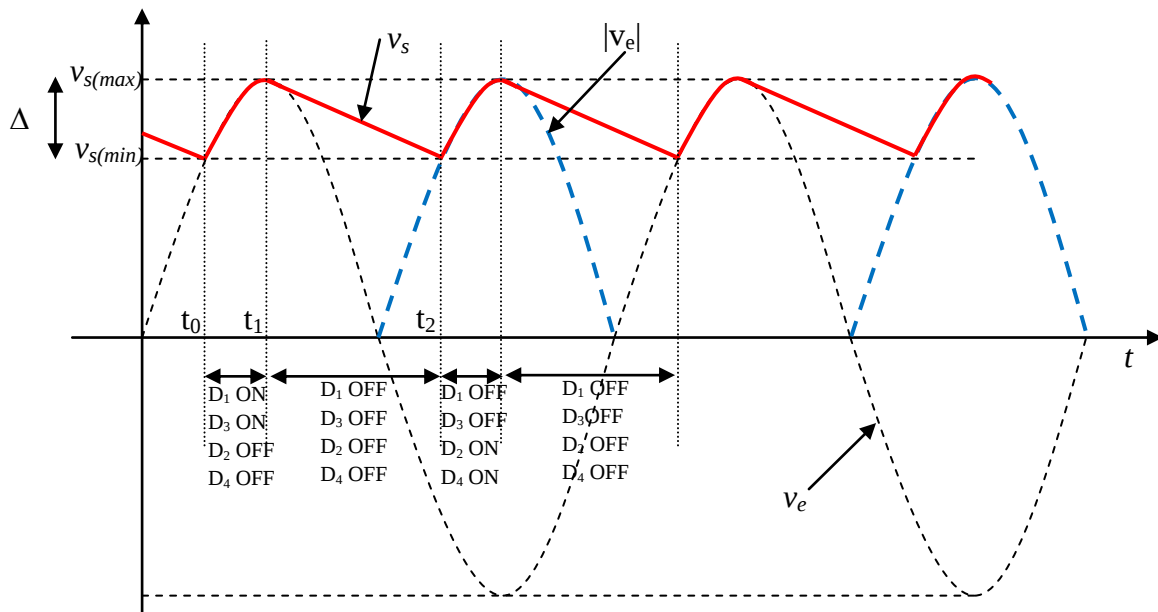
### Analyse de circuit dans le cas des diodes idéales ( $r_d=0$ et $V_d=0$ ):

Lorsque la tension d'entrée  $v_e$  augmente ( $D_{13}$  passantes et  $D_{24}$  bloquées ou l'inverse), le condensateur se charge rapidement à travers la résistance  $R_{eq}=(2r_d/R_L)\approx 0$ . Ce qui implique que:  $v_s=v_e$ . Lorsque la tension d'entrée tend à diminuer (les diodes se bloquent car  $u_C=v_s > v_e$ ), le condensateur se décharge lentement à travers  $R_L$ :  $v_s = V_M \cdot e^{-t/(R_L C)}$ .

Si le condensateur a une capacité C suffisante, les variations de la tension peuvent être négligeables, la tension est quasiment continue.

### Détermination de la tension d'ondulation $\Delta U$ :

La figure ci-dessous représente l'allure typique des courbes des tensions d'entrée et de sortie du redresseur en pont avec capacité de filtrage.



Pour simplifier le calcul de la tension d'ondulation, on prend le cas idéal :  $r_d=0$  et  $V_d=0$ .

- $t_0 \leq t \leq t_1$  : le condensateur se charge rapidement ( $v_s=v_e$ ) à travers les diodes  $D_1$  et  $D_3$ . Même chose durant l'alternance négative mais le condensateur se charge rapidement à travers les diodes  $D_2$  et  $D_4$ .

Dans cet intervalle, le tension du condensateur est exactement celle de générateur d'entrée:

$$v_s = |v_e|;$$

c'est-à-dire  $v_s = v_e$  pendant l'alternance positive et  $v_s = -v_e$  pendant l'alternance négative.

- $t=t_1$  :

A ce moment, la tension  $v_s$  vaut :  $v_s = v_s(max) = V_M$

- $t_1 \leq t \leq t_2$  :

Dans ce cas, le condensateur se décharge à travers la résistance  $R_L$  :

$$v_s = V_M \cdot \exp(-(t - t_1)/\tau), \text{ avec : } \tau = R_L C$$

- $t=t_2$  :

A ce moment, la tension  $v_s$  vaut :  $v_s = v_s(min) = v_s(max) \cdot \exp(-(t_2 - t_1)/\tau)$

A fin que la tension d'ondulation soit faible par rapport a la composante continue, on pose :

$$t_2 - t_1 \ll \tau \Rightarrow \exp(-(t_2 - t_1)/\tau) \approx 1 - (t_2 - t_1)/\tau$$

$$t_2 - t_1 \gg t_1 - t_0 \Rightarrow t_2 - t_1 \approx \frac{T}{2}$$

On remplace dans l'expression de  $v_s(min)$ , on obtient :

$$v_s(min) = v_s(max) \left(1 - \frac{T}{2\tau}\right) \Rightarrow \Delta U = v_s(max) - v_s(min) = \frac{T}{2\tau} v_s(max)$$

$$\Rightarrow \Delta U = \frac{T v_s(max)}{2 R_L C} = \frac{I_{max}}{2 f C}$$

$$\text{avec: } I_{max} = \frac{v_s(max)}{R_L} = \frac{V_M}{R_L} \text{ et } f = \frac{1}{T}$$

### 3.3.2. Circuits à diode Zener :

#### 3.3.2.1. Diode Zener :

La diode Zener est une diode que le constructeur a optimisée pour opérer dans la zone de claquage (Fig.3.9). La diode Zener au claquage présente un coude de tension inverse très net, suivi d'une croissance verticale du courant. La tension est presque constante, c'est la tension Zener  $V_Z$ . Les fiches techniques donnent la tension  $V_Z$  pour un courant de test  $I_{ZT}$ .

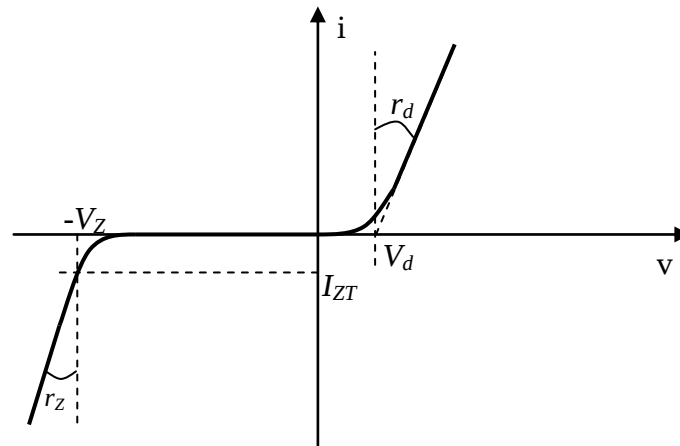
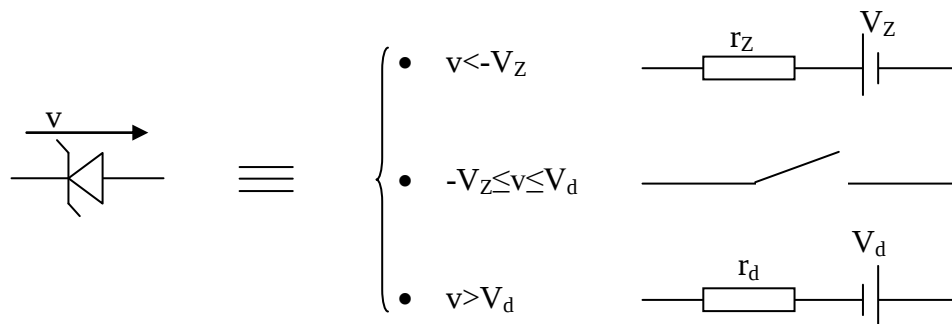


Fig.3.9. Caractéristique I-V d'une diode Zener avec les paramètres du modèle linéaire.

La diode Zener en 3<sup>ème</sup> approximation est présentée par le modèle linéaire ci-dessous.



### 3.3.2.2. Régulateur (stabilisateur) à diode Zener :

Pour que la tension de sortie reste constante (Fig.3.10) il faut que la diode Zener soit polarisée en inverse dans la zone de claquage et que :  $E > \frac{R_L + R_S}{R_L} V_Z$ .

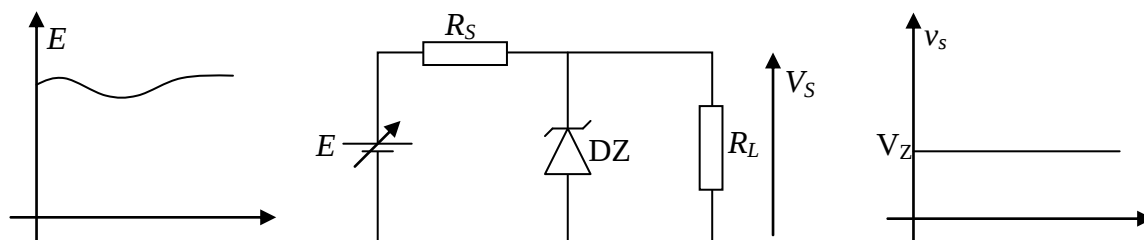
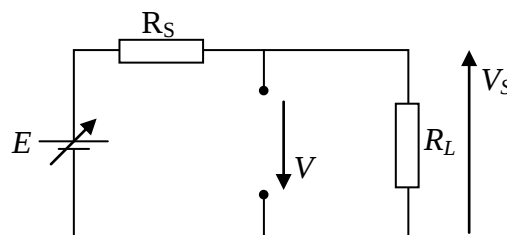


Fig.3.10. Régulateur Zener simple.

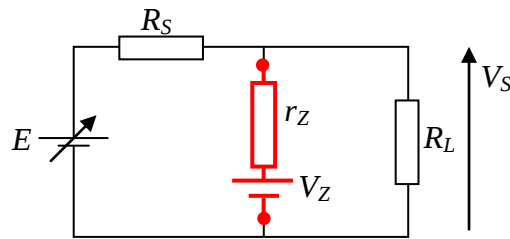
De la même façon que la diode normal, on calcul premièrement la tension  $V = V_{AK}$  de la diode Zener lorsqu'elle est déconnectée.



$$V = -\frac{R_L}{R_L + R_S} E$$

Pour que la diode Zener fonctionne en mode stabilisation de tension, il faut qu'elle est polarisée dans la zone de claquage:  $V < -V_Z \Rightarrow -\frac{R_L}{R_L + R_S} E < -V_Z \Rightarrow E > \frac{R_L + R_S}{R_L} V_Z$

La diode Zener est au claquage et peut être remplacée par une source de tension  $V_Z$  (tension Zener) et une résistance  $r_Z$  (résistance Zener).



En appliquant le théorème de Millman :

$$V_S = \frac{\frac{E}{R_S} + \frac{V_Z}{r_Z}}{\frac{1}{R_S} + \frac{1}{r_Z} + \frac{1}{R_L}}$$

Dans le cas d'une diode idéale, on obtient :  $V_S = V_Z$ .

#### Détermination de la résistance $R_S$ :

On considère les deux cas limites suivants (on néglige la résistance  $r_Z$ ):

- $E = E_{\max}, I_Z = I_{Z\max}, I_L = I_{L\min}$ : 
$$R_S = \frac{E_{\max} - V_Z}{I_{Z\max} + I_{L\min}} \quad (1)$$

- $E = E_{\min}, I_Z = I_{Z\min}, I_L = I_{L\max}$ : 
$$R_S = \frac{E_{\min} - V_Z}{I_{Z\min} + I_{L\max}} \quad (2)$$

Généralement on prend:  $I_{Z\min} = a \cdot I_{Z\max}$ , avec:  $0.1 \leq a \leq 0.3$ .

$$(1) \text{ et } (2) \Rightarrow I_{Z\max} = \frac{(E_{\max} - V_Z)I_{L\max} + (E_{\min} - V_Z)I_{L\min}}{(E_{\min} - V_Z) - a(E_{\max} - V_Z)} \quad (3)$$

En remplaçant (3) dans (1) ou (2), on peut déterminer  $R_S$ .

### 3.3.3. Composants optoélectroniques :

#### 3.3.3.1. La diode électroluminescente (LED) :

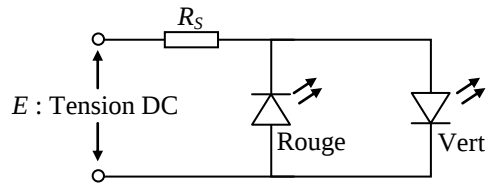
Dans une LED polarisée en direct, il ya émission de radiations lumineuses. Les constructeurs réalisent des LED qui émettent du rouge, du vert, du jaune, du bleu, de l'orange ou de l'infrarouge (invisible). Celles qui émettent dans le visible sont utilisées comme indicateurs ou afficheurs. Celles qui rayonnent dans l'invisible sont employées dans les alarmes sonores, les lecteurs CD, ...etc.

**Exemple :** Indicateur de polarité utilisant deux LED

Pour  $E > V_d > 0$ : la LED vert s'allume parce qu'elle est polarisée en direct.

Pour  $E < -V_d < 0$ : la LED rouge s'allume parce qu'elle est polarisée en direct.

Le courant traversant chaque LED, lorsqu'elle est en conduction, est donnée par :  $i = \frac{E \mp V_d}{R_S}$

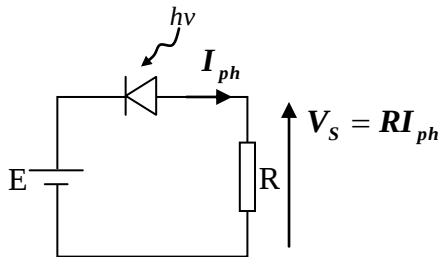


### 3.3.3.2. La photodiode :

La photodiode convertie un signal optique (lumière) en un courant électrique. Le courant total qui parcourt une photodiode est la somme du courant due à la polarisation ( $I_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$ ) et le photo-courant

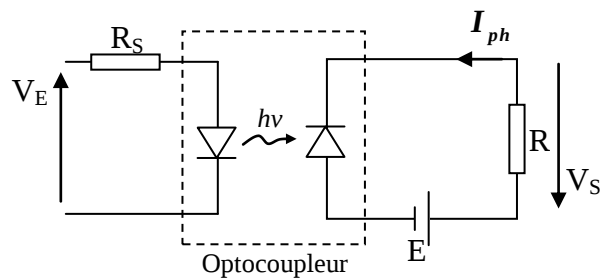
due à la lumière ( $I_{ph}$ ) :  $i = I_{ph} + I_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right)$ ;  $I_s \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \approx 0$ , lorsque  $V < 0$ .

La photodiode est polarisée en inverse pour réduire l'effet du courant due à la polarisation :



### 3.3.3.3. L'optocoupleur ou l'optoisolateur :

Un optocoupleur associe une LED (émettrice de la lumière) et une photodiode (capteur de la lumière) dans un même boîtier. L'avantage essentiel d'un optocoupleur est l'isolation électrique entre l'entrée et la sortie.



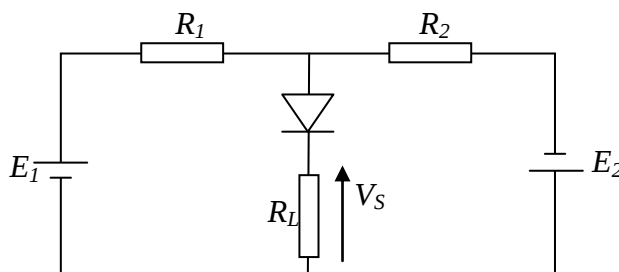
## Solutions des exercices de la série N°3: Circuits à diodes.

### Exercice N°1:

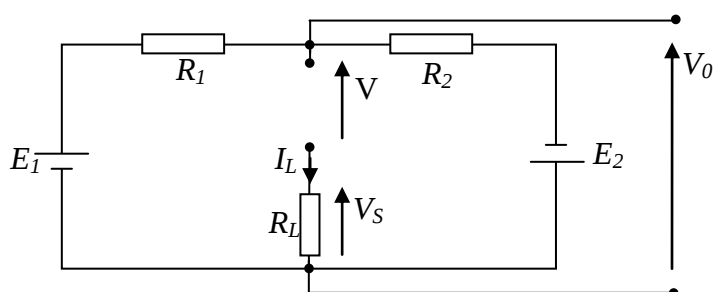
Calculer la tension  $V_S$  aux bornes de la résistance  $R_L$  dans les deux cas suivants:

- $E_1=6\text{ V}$  et  $E_2=5\text{ V}$ .
- $E_1=12\text{ V}$  et  $E_2=8\text{ V}$ .

On donne:  $R_1=R_2=R_L=1\text{ k}\Omega$ .



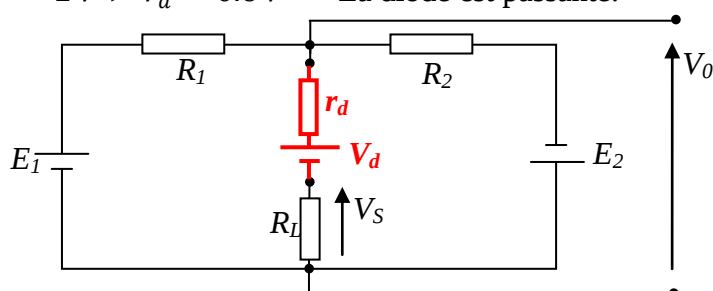
**Etape 1:** calcul de la tension  $V = V_{\text{Anode}} - V_{\text{Cathode}}$  lorsque la diode est déconnectée.



on a: 
$$V_0 = \frac{\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}, \quad V_0 = V + R_L I_L \quad \text{et} \quad I_L = 0$$

$$\Rightarrow V = \frac{\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

- $E_1=6\text{ V}$  et  $E_2=5\text{ V}$ :  
 $V = 0.5\text{ V} < V_d = 0.6\text{ V} \Rightarrow$  La diode est bloquée  $\Rightarrow V_S = R_L I_L = 0$ .
- $E_1=12\text{ V}$  et  $E_2=8\text{ V}$ :  
 $V = 2\text{ V} > V_d = 0.6\text{ V} \Rightarrow$  La diode est passante.



$$V_S = \frac{R_L}{R_L + r_d} (V_0 - V_d) \quad ; \text{ en utilisant le théorème de diviseur de tension.}$$

avec 
$$V_0 = \frac{\frac{E_1}{R_1} + \frac{V_d}{R_L + r_d} - \frac{E_2}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_L + r_d} + \frac{1}{R_2}} ; \text{ en utilisant le théorème de Millman.}$$

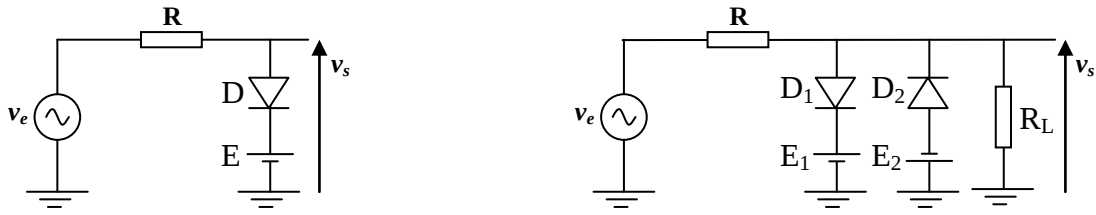
$$\Rightarrow V_S = 0.9\text{ V}$$

## Exercice N°2: Ecrêteurs et limiteurs

La source de tension est sinusoïdale de la forme :  $v_e = V_M \sin(\omega t)$ .

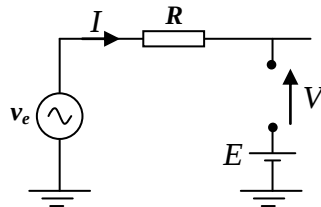
Les diodes possèdent une tension de seuil  $V_d$  et une résistance dynamique  $r_d$ .

Déterminez la tension de sortie et tracez la caractéristique de transfert  $v_s = f(v_e)$  pour les deux circuits.



### Schéma (a):

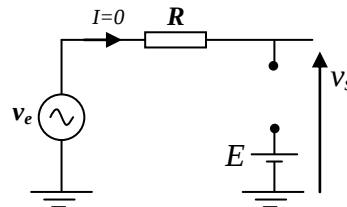
La détermination de l'état de la diode passe par le calcul de la tension entre l'anode et la cathode  $V = V_{AK}$  lorsque la diode est débranchée du circuit.



$$v_e - RI - V - E = 0 \Rightarrow V = v_e - E ; \text{ le courant } I=0.$$

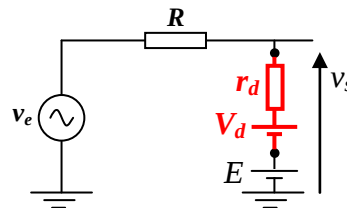
Maintenant, la tension  $V$  doit être comparée à la tension de seuil  $V_d$  de la diode.

- Si  $V \leq V_d \Rightarrow$  la diode ne conduit pas et elle se comporte comme un interrupteur idéal.  
 $V \leq V_d \Rightarrow v_e - E \leq V_d \Rightarrow v_e \leq E + V_d.$



$$v_e - RI - v_s = 0 \Rightarrow v_s = v_e.$$

- Si  $v_e > E + V_d \Rightarrow$  la diode conduit et il est possible de la remplacer par son modèle linéaire.



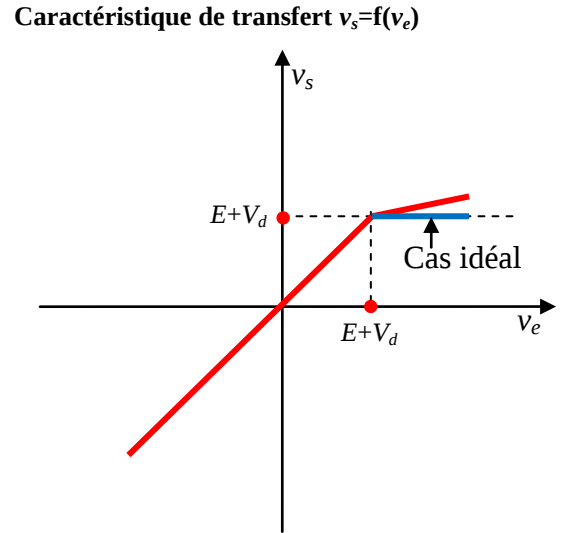
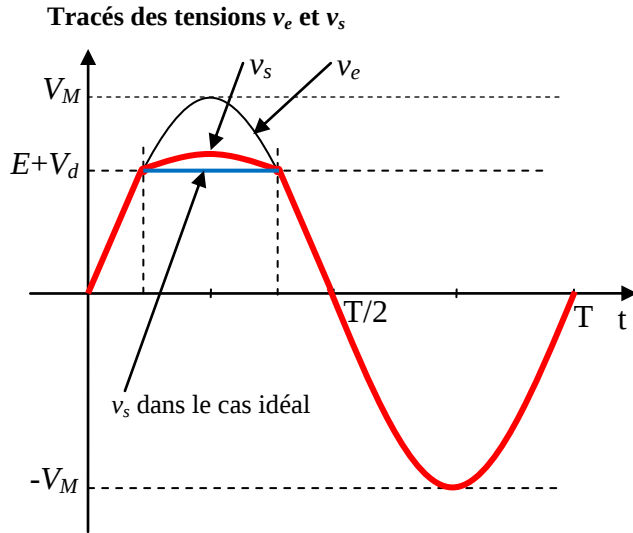
On peut calculer  $v_s$  de deux manières différentes:

- en utilisant la loi des mailles et le diviseur de tension:

$$v_s = E + V_d + \frac{r_d}{r_d + R} (v_e - V_d - E) = \frac{R(E + V_d) + r_d v_e}{r_d + R}$$

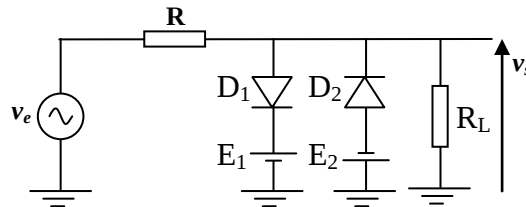
- ou bien en utilisant la loi de Millman:

$$v_s = \frac{\frac{v_e + E + V_d}{R + \frac{1}{r_d}}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_d}} = \frac{R(E + V_d) + r_d v_e}{r_d + R}.$$



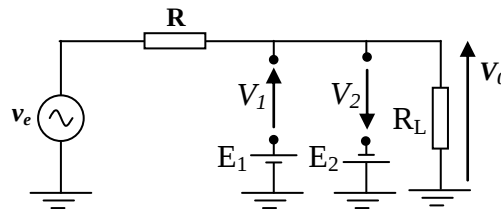
### Schéma (b):

Ce circuit peut être analysé par deux méthodes.



### Méthode 1:

Dans cette méthode, on détermine les tensions anode-cathode ( $V_1$  et  $V_2$ ) des deux diodes  $D_1$  et  $D_2$  lorsqu'elles sont déconnectées.



$$V_1 = V_0 - E_1 = \frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_1$$

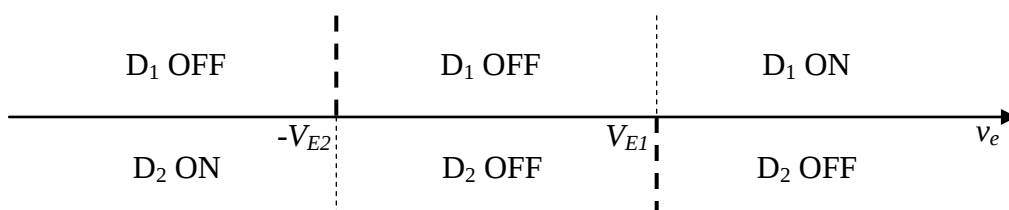
$$V_2 = -V_0 - E_2 = -\frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_2$$

La diode  $D_1$  se bloque si:  $V_1 \leq V_d \Rightarrow \frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_1 \leq V_d \Rightarrow v_e \leq \frac{R_L + R}{R_L} (E_1 + V_d)$

La diode  $D_2$  se bloque si:  $V_2 \leq V_d \Rightarrow -\frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_2 \leq V_d \Rightarrow v_e \geq -\frac{R_L + R}{R_L} (E_2 + V_d)$

On pose:  $V_{E1} = \frac{R_L + R}{R_L} (E_1 + V_d)$  et  $V_{E2} = \frac{R_L + R}{R_L} (E_2 + V_d)$

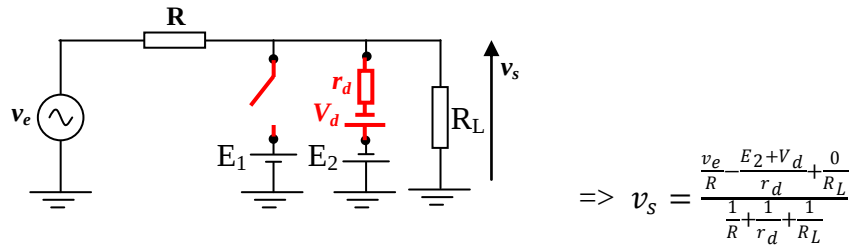
L'intersection des intervalles ci-dessus peuvent être schématisé comme dans la figure suivante.



On distingue trois intervalles:

**Intervalle 1:  $v_e < -V_{E2}$**

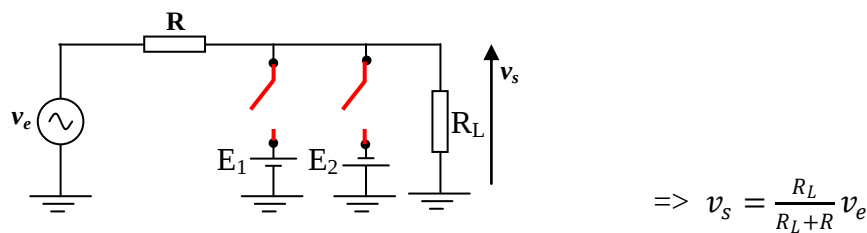
La diode  $D_2$  conduit et  $D_1$  est bloquée.



Dans le cas des diodes idéales:  $v_s = -E_2$

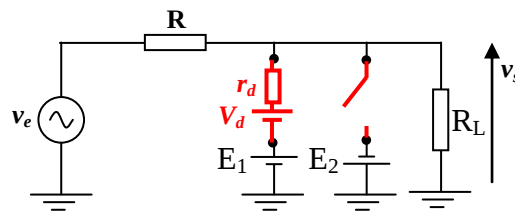
**Intervalle 2:  $-V_{E2} < v_e < V_{E1}$**

Les diodes  $D_2$  et  $D_1$  sont bloquées.



**Intervalle 3:  $v_e > V_{E1}$**

La diode  $D_1$  conduit et  $D_2$  est bloquée.



Alors: 
$$v_s = \frac{\frac{v_e}{R} + \frac{E_1 + V_d}{r_d} + \frac{0}{R_L}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_d} + \frac{1}{R_L}}$$

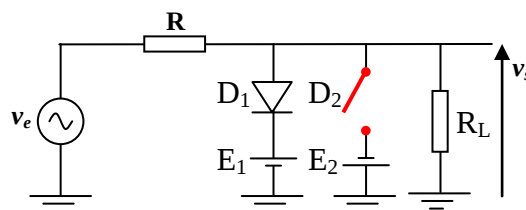
Dans le cas des diodes idéales:  $v_s = E_1$

**Méthode 2:**

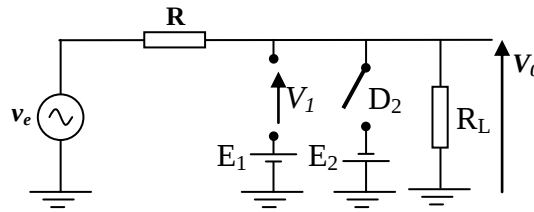
Dans cette méthode, on fait l'analyse en deux intervalles du temps: premièrement pendant l'alternance positive ensuite pendant l'alternance négative.

**Pendant l'alternance positive ( $v_e \geq 0$ ):**

La cathode de la diode  $D_2$  est au potentiel haut de la source  $v_e$  tandis que l'anode est au potentiel bas de la source  $E_2$ . Alors la diode  $D_2$  est **polarisée en inverse** ce qui signifie qu'elle est **bloquée**.

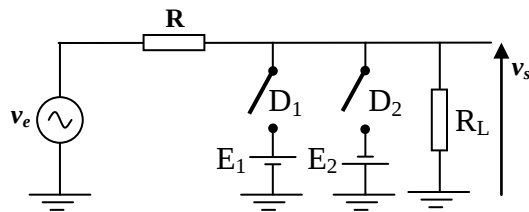


On a un circuit à une seule diode. On calcul la tension anode-cathode  $V_1$  de la diode  $D_1$  lorsqu'elle est déconnectée du circuit ensuite on la compare à la tension de seuil  $V_d$  de la diode.



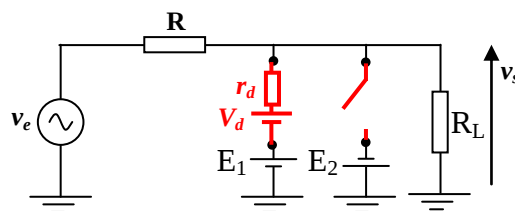
$$\begin{cases} V_0 = \frac{R_L}{R_L + R} v_e \\ V_0 = V_1 + E_1 \end{cases} \Rightarrow V_1 = \frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_1$$

- Si  $V_1 \leq V_d \Rightarrow$  la diode  $D_1$  est bloquée.  
 $\Rightarrow V_1 = \frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_1 \leq V_d \Rightarrow v_e \leq \frac{R_L + R}{R_L} (E_1 + V_d)$



$$v_s = \frac{R_L}{R_L + R} v_e$$

- Si  $V_1 > V_d \Rightarrow$  la diode  $D_1$  est conductrice.  
 $\Rightarrow V_1 = \frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_1 > V_d \Rightarrow v_e > \frac{R_L + R}{R_L} (E_1 + V_d)$

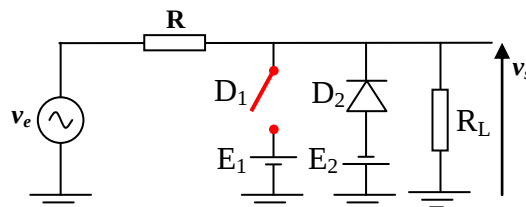


$$\Rightarrow v_s = \frac{\frac{v_e}{R} + \frac{E_1 + V_d}{r_d} + \frac{0}{R_L}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_d} + \frac{1}{R_L}}$$

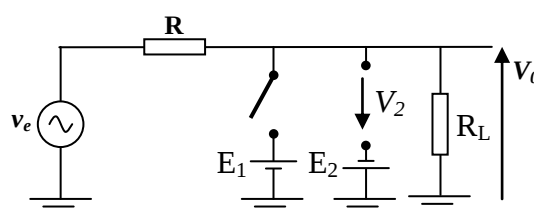
Dans le cas des diodes idéales:  $v_s = E_1$ .

### Pendant l'alternance négative ( $v_e \leq 0$ ):

La cathode de la diode  $D_1$  est au potentiel haut de la source  $E_1$  tandis que l'anode est au potentiel bas de la source  $v_e$ . Alors la diode  $D_1$  est **polarisée en inverse** ce qui signifie qu'elle est **bloquée**.



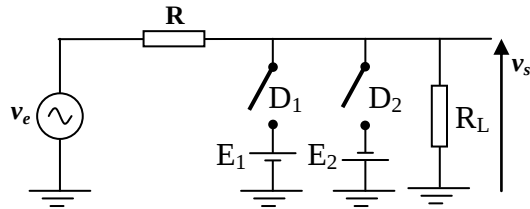
On a un circuit à une seule diode. On calcul la tension anode-cathode  $V_2$  de la diode  $D_2$  lorsqu'elle est déconnectée du circuit ensuite on la compare à la tension de seuil  $V_d$  de la diode.



$$\begin{cases} V_0 = \frac{R_L}{R_L + R} v_e \\ V_0 = -V_2 - E_2 \end{cases} \Rightarrow V_2 = -\frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_2$$

- Si  $V_2 \leq V_d \Rightarrow$  la diode  $D_2$  est bloquée.

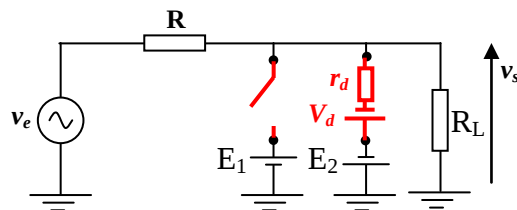
$$\Rightarrow V_2 = -\frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_2 \leq V_d \Rightarrow v_e \geq -\frac{R_L + R}{R_L} (E_2 + V_d)$$



$$v_s = \frac{R_L}{R_L + R} v_e$$

- Si  $V_2 > V_d \Rightarrow$  la diode  $D_2$  est conductrice.

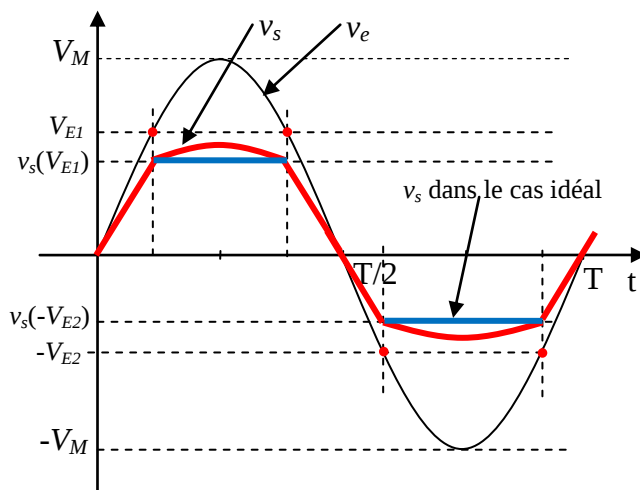
$$\Rightarrow V_2 = -\frac{R_L}{R_L + R} v_e - E_2 > V_d \Rightarrow v_e < -\frac{R_L + R}{R_L} (E_2 + V_d)$$



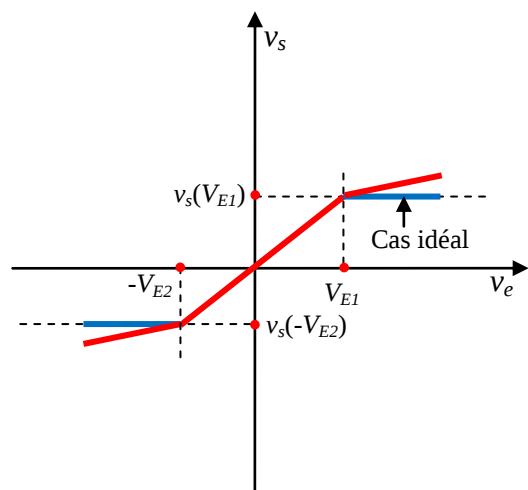
$$\Rightarrow v_s = \frac{\frac{v_e}{R} - \frac{E_2 + V_d}{r_d} + \frac{0}{R_L}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_d} + \frac{1}{R_L}}$$

Dans le cas des diodes idéales:  $v_s = -E_2$ .

### Tracés des tensions $v_e$ et $v_s$



### Caractéristique de transfert $v_s = f(v_e)$



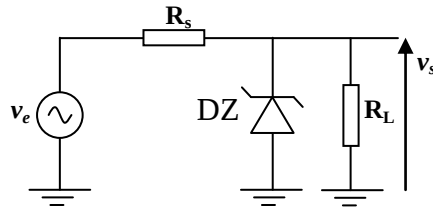
### Exercice N°3 : Régulateur Zener simple

La diode Zener  $DZ$  a une tension de claquage (tension Zener)  $V_Z = 6 \text{ V}$  et une résistance Zener  $r_Z = 6 \Omega$ . La source est une tension sinusoïdale avec un offset:  $v_e = V_M \sin(\omega t) + V_0$ .

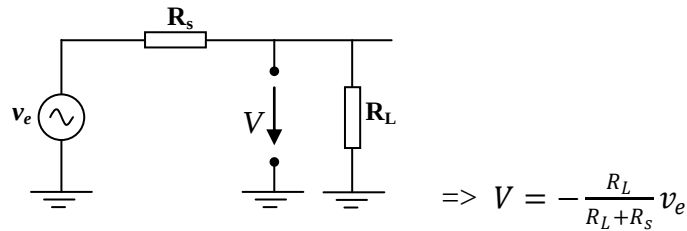
$V_M = 1 \text{ V}$ ,  $V_0 = 30 \text{ V}$ ,  $R_s = 470 \Omega$ ,  $R_L = 680 \Omega$ .

Tracez dans le même graphe les tensions  $v_e$  et  $v_s$ .

Calculez la puissance dissipée dans la charge  $R_L$ .



Comme pour la diode normale, on calcule la tension anode-cathode de la diode Zener lorsque celle-ci est débranchée.

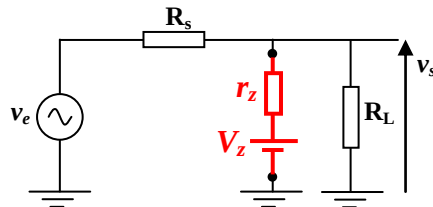


Selon les données de l'exercice, on a:

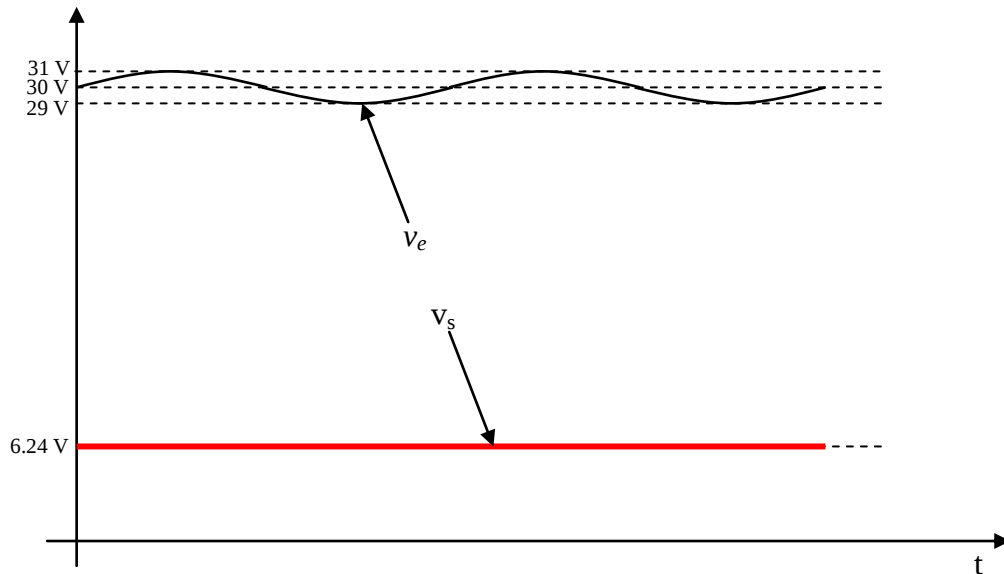
$$v_e = V_M \sin(\omega t) + V_0 = \sin(\omega t) + 30 \text{ V}$$

$$\Rightarrow 29 \text{ V} \leq v_e \leq 31 \text{ V} \Rightarrow -18.3 \leq V = -\frac{R_L}{R_L + R_s} v_e \leq -17.1 \text{ V}$$

On remarque que  $V < -V_Z = -6 \text{ V}$ , donc la diode Zener est au claquage.



$$v_s = \frac{\frac{v_e}{R_s} + \frac{V_Z}{r_z}}{\frac{1}{R_s} + \frac{1}{r_z} + \frac{1}{R_L}} = 0.01v_e + 5.87 \text{ (V)} = 0.01\sin(\omega t) + 6.24 \text{ (V)} \cong 6.24 \text{ (V)}$$



La puissance dissipée dans la charge  $R_L$  est donnée par l'expression suivante:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{V_{RL}^2}{R_L} dt; \text{ avec: } V_{RL} = v_s \cong 6.24 \text{ V}$$

$$\Rightarrow P = 57 \text{ mW}.$$