

# **Ecole Supérieure en Génie Electrique et Energétique Oran**

## ***Polycopié de Cours***

1<sup>ère</sup> Année second cycle « Ingénieur en Énergétique »

## **Electronique Générale**

*Dr. BENOUAR*

*Dr. ADLI*

*Ali*

*Walid*

*Maître de conférences classe A*

*Maître de conférences classe A*

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Electrocénitique</b>	<b>4</b>
1.1	Dipôle électrique . . . . .	1
1.2	Circuit électrique . . . . .	2
1.2.1	Loi des noeuds ((Première loi de Kirchhoff) . . . . .	2
1.2.2	Loi des mailles (Deuxième loi de Kirchhoff) . . . . .	2
1.3	Signaux électriques . . . . .	2
1.3.1	Types de signaux électriques . . . . .	2
1.3.2	Le signal sinusoïdal . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Systemes linéaires et continus</b>	<b>4</b>
2.1	Circuits du 1er ordre en régime harmonique . . . . .	5
2.1.1	Étude du circuit RC . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Composants électroniques</b>	<b>8</b>
3.1	La diode . . . . .	8
3.1.1	Définition . . . . .	8
3.1.2	Fonctionnement . . . . .	8
3.1.3	Caractéristique courant-tension : . . . . .	8
3.1.4	Droite de charge et point de fonctionnement de la diode : . . . . .	11
3.2	Thyristor . . . . .	11
3.2.1	Définition . . . . .	11
3.2.2	Fonctionnement du thyristor . . . . .	11
3.3	Transistor bipolaire . . . . .	12
3.4	Transistor MOS . . . . .	14
<b>4</b>	<b>Conversion d'énergie</b>	<b>16</b>
4.1	Applications des diodes . . . . .	17
4.1.1	Introduction . . . . .	17
4.1.2	Transformateur . . . . .	17
4.1.3	Redressement . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Amplificateur linéaire</b>	<b>28</b>
5.1	Amplificateur linéaire . . . . .	31
5.1.1	Principales caractéristiques . . . . .	31
5.1.2	Fonctionnement des amplificateurs opérationnels . . . . .	31

# Table des figures

1.1	Resistance . . . . .	1
1.2	Condensateur . . . . .	1
1.3	Bobine . . . . .	2
1.4	Signal sinusoïdal . . . . .	3
2.1	Circuit RC . . . . .	5
2.2	Courbe de charge d'un condensateur . . . . .	6
2.3	Courbe de charge d'un condensateur . . . . .	6
2.4	Circuit RC en décharge . . . . .	7
3.1	Diode à jonction PN . . . . .	8
3.2	Polarisation directe d'une diode . . . . .	8
3.3	Polarisation inverse d'une diode . . . . .	8
3.4	Caractéristique courant-tension . . . . .	9
3.5	Droite de charge . . . . .	11
3.6	Thyristor . . . . .	11
3.7	Circuit d'amorçage du Thyristor . . . . .	12
3.8	Transistor bipolaire . . . . .	12
3.9	Transistor bipolaire . . . . .	13
3.10	Transistor MOS . . . . .	14
3.11	Transistor MOS à canal induit . . . . .	15
4.1	Diagramme de bloc d'un circuit d'alimentation . . . . .	17
4.2	Transformateur . . . . .	17
4.3	Montage simple alternance . . . . .	18
4.4	Montage simple alternance (diode passante) . . . . .	18
4.5	Montage simple alternance (diode bloquée) . . . . .	18
5.1	Amplificateur Opérationnel . . . . .	31
5.2	Schéma équivalent . . . . .	31

Chapitre 1

Electrocénitique

## 1.1 Dipôle électrique

Un dipôle c'est un composant électrique comportant deux bornes.

Les dipôles électriques peuvent être classés en deux catégories :

- **Dipôles générateurs** : Ce sont des composants qui produisent de l'énergie électrique au circuit. Ils convertissent généralement forme d'énergie différente (comme l'énergie mécanique, chimique, solaire, etc.) en énergie électrique. Les générateurs produisent une différence de potentiel électrique (tension) pour alimenter les dipôles du circuit.
  - **Dipôles récepteurs** : Ils sont également appelés charges ou consommateurs. Les dipôles récepteurs ne génèrent pas d'énergie électrique, mais ils utilisent l'électricité fournie par les générateurs. Ces composants reçoivent l'énergie électrique et la convertissent en une autre forme d'énergie utile, comme la lumière (pour les ampoules), la chaleur (pour les chauffages), le mouvement (pour les moteurs), etc.
- a. **La résistance** : La résistance, mesurée en ohms, est la propriété d'un composant électronique qui empêche le passage de l'électricité. Il est chargé de limiter le courant électrique dans le circuit. Les résistances, souvent représentées par le symbole  $R$ , sont des composants clés dans la conception de circuits et sont utilisées pour contrôler le courant et la tension dans un circuit.

La loi d'Ohm établit une relation entre la tension et le courant dans une résistance.

$$v_R(t) = R.i(t)$$

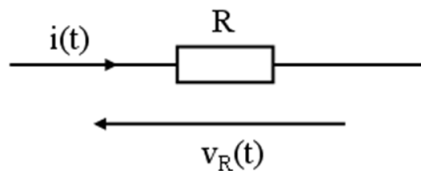


FIGURE 1.1 – Resistance

- b. **Le condensateur** : Les condensateurs sont des composants électriques largement utilisés dans les circuits électroniques. Il est conçu pour stocker et libérer de l'énergie électrique sous forme de champs électrostatiques. Un condensateur est constitué de deux plaques conductrices séparées par un isolant appelé diélectrique. Lorsqu'une tension est appliquée aux bornes d'un condensateur, une charge s'accumule sur les plaques, créant un champ électrique entre elles. Ce champ électrique stocke l'énergie électrique sous forme d'électrons sur les plaques du condensateur.

Considérons un condensateur  $C$  parcouru par un courant La tension à ses bornes est :

$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$$

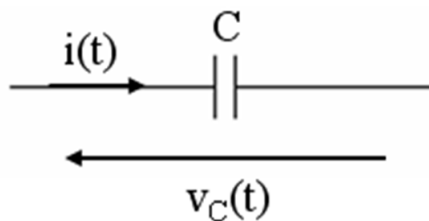


FIGURE 1.2 – Condensateur

- c. **La bobine** : Une bobine est un composant électrique qui consiste en un enroulement de fil conducteur autour d'un noyau, souvent fabriqué à partir de matériaux tels que le fer, le ferrite ou l'air. Lorsqu'un courant électrique traverse la bobine, un champ magnétique est créé autour d'elle. Les bobines sont utilisées dans divers circuits électroniques pour des applications telles que le filtrage des signaux, la création de champs magnétiques pour les transformateurs, les moteurs électriques, les systèmes de communication sans fil, les dispositifs médicaux, et bien d'autres. Elles jouent un rôle crucial dans la manipulation et la transmission de l'énergie électrique et magnétique.

Considérons une bobine d'inductance  $L$  parcourue par un courant La tension aux bornes de la bobine d'inductance  $L$  parcourue par un courant est :

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$$

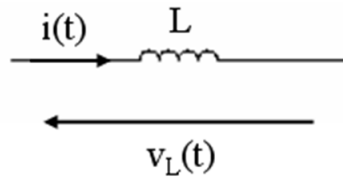


FIGURE 1.3 – Bobine

## 1.2 Circuit électrique

Le circuit électrique est un système de composants interconnectés conçu pour permettre le passage d'un courant électrique. Il est composé des dipôles tels que des générateurs (sources d'énergie électrique), des conducteurs (fils, câbles), des composants (résistances, condensateurs, bobines, semi-conducteurs tels que les diodes, les transistors), ainsi que des éléments de commande tels que les interrupteurs. Dans un circuit électrique, on distingue :

- **Branche** : Une branche dans un circuit électrique est une section qui relie deux nœuds adjacents. Elle peut contenir un ou plusieurs composants tels que des résistances, des condensateurs, des sources de tension ou de courant, etc.
- **Maille** : La maille est un contour fermé dans un circuit, formée par une série de branches interconnectées sans qu'aucune d'elles ne se croise.
- **Nœud** : Un nœud est un point de connexion où trois ou plusieurs fils se rencontrent. À un nœud, le courant total entrant est égal au courant total sortant, selon la loi des nœuds de Kirchhoff.

### 1.2.1 Loi des nœuds ((Première loi de Kirchhoff))

La loi des nœuds, également connue sous le nom de loi de Kirchhoff des courants, est un principe fondamental en électrotechnique qui énonce :

*La somme des courants entrants à un nœud dans un circuit électrique est égale à la somme des courants sortants de ce même nœud.*

$$\sum_{k=1}^N I_K = 0$$

### 1.2.2 Loi des mailles (Deuxième loi de Kirchhoff)

La loi des mailles permet d'étudier le comportement des tensions à l'intérieur d'un circuit électrique.

*La loi des mailles est une loi de l'électricité qui décrit le comportement des tensions dans un circuit électrique. Elle stipule que la somme algébrique des tensions le long d'une maille est toujours égale à zéro.*

$$\sum_{k=1}^N \Delta V_K = 0$$

## 1.3 Signaux électriques

Les signaux électriques constituent une base importante dans les domaines de l'électronique et des communications. Ils permettent de transmettre, traiter et stocker des informations. Un signal électrique est l'expression d'une tension ou d'un courant qui varie en fonction du temps.

### 1.3.1 Types de signaux électriques

- **Signaux Analogiques** : Ces signaux varient continuellement dans le temps et peuvent prendre des valeurs infinies à tout moment.
- **Signaux Numériques** : Ces signaux prennent des valeurs différentes à un instant précis. Ils sont couramment utilisés dans l'informatique et les communications numériques.

### 1.3.2 Le signal sinusoïdal

Un signal sinusoïdal est un signal périodique particulier. ce type de signal est décrit par une fonction, qui est une fonction (**Sinys**) La forme générale d'un signal sinusoïdal peut être exprimée comme suit : §

$$S(t) = S_M \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{f} \text{ et } T = \frac{1}{f}$$

Avec

où :

- $S(t)$  est la valeur du signal à l'instant  $t$ .
- $S_M$  est l'amplitude du signal.
- $\omega$  est la pulsation du signal exprimée en radian par seconde [Rad/s]
- $f$  est la fréquence exprimée en Hertz (Hz).
- $T$  est la période du signal exprimée en Seconde (s).
- $\varphi$  est la phase à l'origine (à  $t = 0$ ) exprimée en radian [Rad] ou en [degré].

#### Représentation temporelle (cartésienne) d'un signal sinusoïdal :

Pour représenter graphiquement un signal sinusoïdal, on utilise un graphique où l'axe des abscisses (horizontal) représente le temps ( $t$ ), et l'axe des ordonnées (vertical) représente l'amplitude du signal à chaque instant.

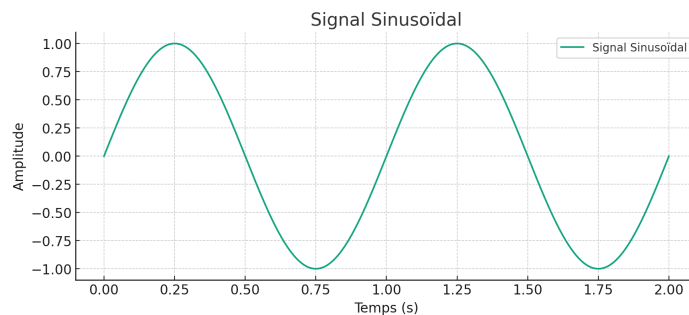


FIGURE 1.4 – Signal sinusoïdal

#### Valeur efficace

La valeur efficace d'une grandeur périodique est définie comme étant la racine carrée de la moyenne des carrés de cette grandeur, évaluée sur une période complète :

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T S_{Max}^2 \sin^2(\omega t + \varphi)}$$

#### Valeur moyenne

pour une tension sinusoïdale, la valeur moyenne est donnée par la relation suivante :

$$S_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T S_{Max} \sin(\omega t + \varphi)$$

#### Le diagramme de Fresnel :

La représentation vectorielle de Fresnel d'un signal  $S(t) = S_M \sin(\omega t + \varphi)$  correspond à un vecteur  $S_{Max}$  dont le module est  $S_{Max}$ . Ce vecteur tourne dans le sens trigonométrique (anti-horaire) avec une vitesse angulaire  $\omega$ .

## Chapitre 2

# Systemes linéaires et continus



## 2.1 Circuits du 1er ordre en régime harmonique

On appelle circuit linéaire du premier ordre un circuit électrique dont la variation des grandeurs électriques (tension, intensité) est régie par une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficient constants.

### 2.1.1 Étude du circuit RC

Cas de charge

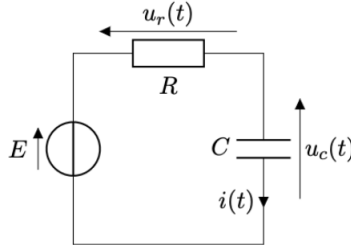


FIGURE 2.1 – Circuit RC

Dans la figure 2.1, le condensateur est initialement déchargé. A l'instant  $t = 0^+$ , le condensateur commence à se charger. Par la loi des mailles, on a l'équation suivante :

$$E = u_c(t) + u_R(t)$$

$$E = u_c(t) + Ri(t) \text{ et } i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

$$E = u_c(t) + RC \frac{du_c(t)}{dt}$$

$$\frac{E}{RC} = \frac{u_c(t)}{RC} + \frac{du_c(t)}{dt}$$

On pose  $\tau = RC$ , on obtient :

$$\frac{E}{\tau} = \frac{u_c(t)}{\tau} + \frac{du_c(t)}{dt}$$

Il s'agit d'une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficients constants. La solution de cette équation est :

$$u_c(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + E$$

$$u_c(0) = 0 = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + E$$

Pour déterminer la constante  $A$ , on utilise les conditions initiales. A  $t = 0$  la tension aux bornes du condensateur  $u_c(t) = 0$ , donc :

$$u_c(0) = 0 = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + E$$

$$u_c(0) = 0 = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + E \Leftrightarrow A = -E$$

$$u_c(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

La figure 2.2 représente la courbe de charge d'un condensateur. La tension est initialement nulle et augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur limite.

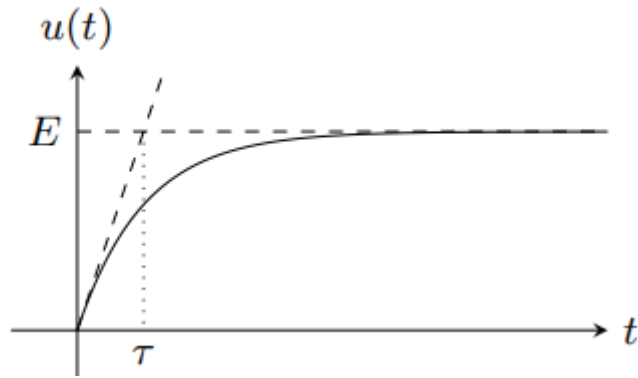


FIGURE 2.2 – Courbe de charge d'un condensateur

A partir de l'expression de la tension de charge du condensateur, on peut déduire le courant qui le traverse :

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

$$i_C(t) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

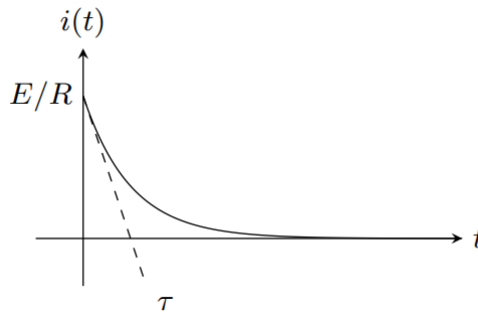


FIGURE 2.3 – Courbe de charge d'un condensateur

### Bilan énergétique

Pour les circuits RC pendant la phase de charge, le bilan énergétique repose sur le fait que l'énergie fournie par la source de tension est en partie stockée dans le condensateur et en partie dissipée sous forme de chaleur par la résistance.

$$E = u_c + u_R$$

$$Ei = u_c i + u_R i$$

$$Ei = u_c i + Ri^2$$

$$Ei = Cu_c \frac{du_c}{dt} + Ri^2$$

$$Ei = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Cu_c^2 \right) + Ri^2$$

$$Ei = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Cu_c^2 \right) + Ri^2$$

$$\int_0^{\infty} Ei dt = \int_0^{\infty} Ri^2 dt + \int_0^{\infty} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Cu_c^2 \right) \int_0^{t \rightarrow +\infty} Ei dt = CE \int_0^{t \rightarrow +\infty} \frac{du_c}{dt} dt = CE [u_c(t \rightarrow +\infty) - u_c(0)] = CE^2$$

$$\int_0^{t \rightarrow +\infty} Ri^2 dt = \int_0^{t \rightarrow +\infty} \frac{E^2}{R^2} \exp\left(-\frac{2t}{\tau}\right) dt = \frac{E^2 \tau}{2R} = \frac{1}{2} CE^2$$

$$\int_0^{t \rightarrow +\infty} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} Cu_c^2 \right) dt = -\frac{1}{2} CE^2$$

**Cas de décharge**

A  $t=0$ , le condensateur est complètement chargé ( $u_C = E$ ) et commence à se décharger à travers la résistance  $R$ .

le circuit obéit à la loi des mailles :

$$0 = u_c + u_R$$

$$0 = u_c + u_R$$

$$0 = u_c(t) + Ri(t) \text{ et } i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

$$0 = u_c(t) + RC \frac{du_c(t)}{dt}$$

$$\frac{u_c(t)}{RC} + \frac{du_c(t)}{dt} = 0$$

La tension  $u_C$  vérifie donc l'équation différentielle du premier ordre et la solution est la suivante :

$$u_c(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$$

Pour  $t = 0$

$$u_c(0) = E = A$$

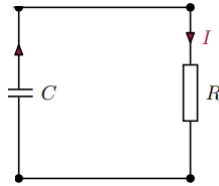


FIGURE 2.4 – Circuit RC en décharge

## Chapitre 3

# Composants électroniques

## 3.1 La diode

### 3.1.1 Définition

Une diode est un composant électronique passif doté de deux bornes : une anode et une cathode qui permettent principalement au courant électrique de circuler dans une direction. Il se compose de deux parties de semi-conducteurs dopés qui forment une jonction P-N (figure 3.1).

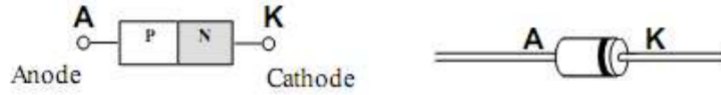


FIGURE 3.1 – Diode à jonction PN

### 3.1.2 Fonctionnement

La diode a deux régimes de fonctionnement principaux :

- **Polarisation directe** : Lorsque l'anode est connectée au pôle positif de la source d'alimentation et la cathode au pôle négatif, la diode est en polarisation directe, permettant le passage du courant.

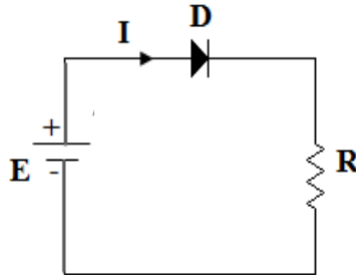


FIGURE 3.2 – Polarisation directe d'une diode

- **Polarisation inverse** : Lorsque l'anode est connectée au pôle négatif et la cathode au pôle positif, la diode est en polarisation inverse, bloquant le passage du courant.

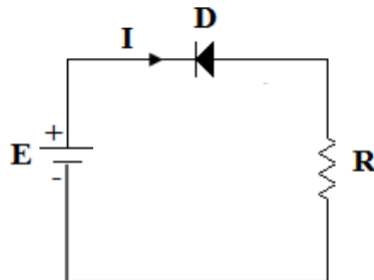


FIGURE 3.3 – Polarisation inverse d'une diode

### 3.1.3 Caractéristique courant-tension :

La relation entre le courant de la diode  $I_D$  et la tension aux bornes de la diode  $V_D$  est donnée par la relation suivante :

$$I_d = I_s \left( \exp\left(\frac{qV_d}{\eta K_b T}\right) - 1 \right)$$

- $I_D$  est le courant dans la diode.
- $I_S$  est le courant de saturation inverse de la diode.
- $q$  est la charge de l'électron,  $q = 1,6 \times 10^{-19}$  C [Rad/s]
- $V_D$  est la tension aux bornes de la diode.
- $K_b$  est la constante de Boltzmann,  $K_b = 1,38 \times 10^{-23}$  J/K =  $8,62 \times 10^{-5}$  eV/K.

- $T$  est la température absolue en kelvin ( $^{\circ}\text{K}$ ).
- $\eta$  est le facteur d'idéalité de la diode (typiquement entre 1 et 2)

La figure 3.4 montre la relation entre la tension appliquée et le courant qui traverse la diode.

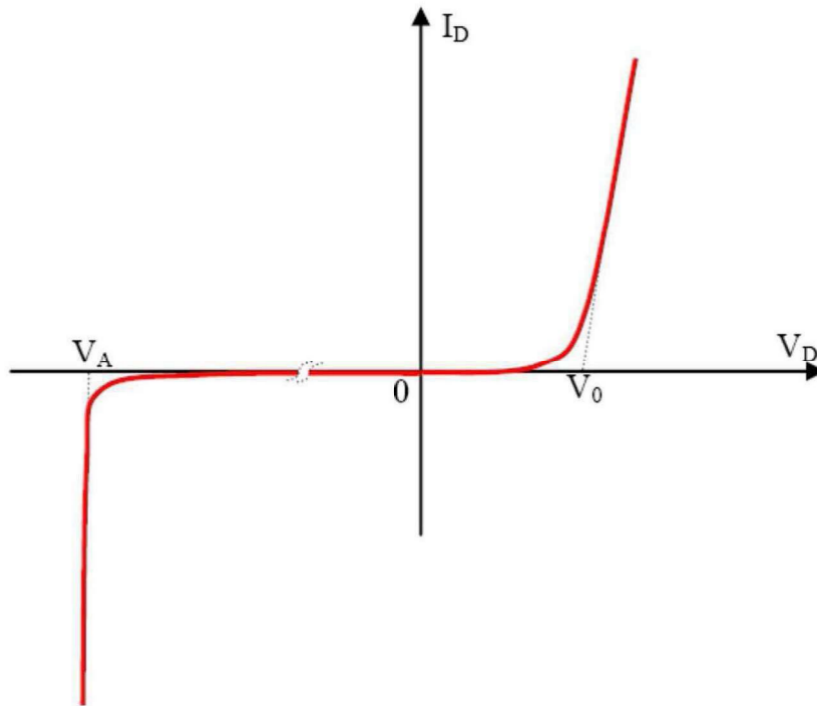
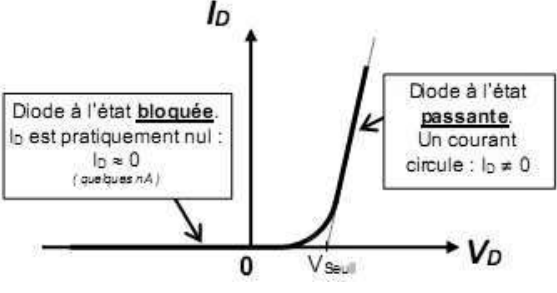
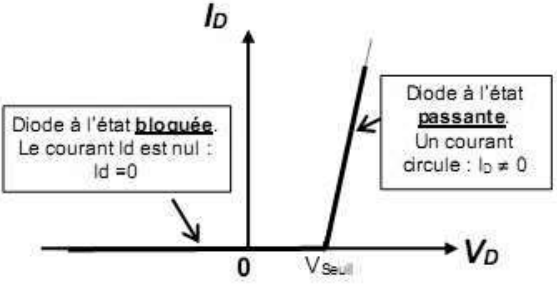
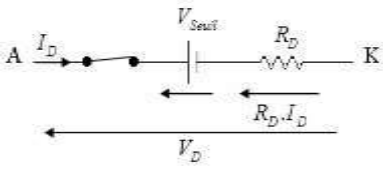
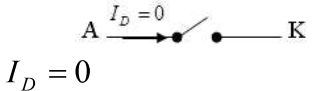
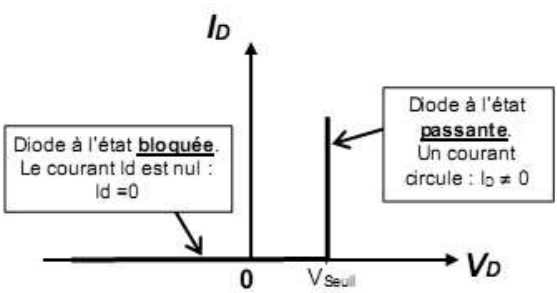
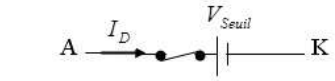
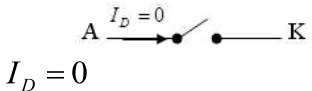


FIGURE 3.4 – Caractéristique courant-tension

Cette courbe caractérise la dépendance exponentielle du courant passant à travers la diode en fonction de la tension appliquée. Elle indique que pour des petites augmentations de la tension appliquée en polarisation directe (au-delà de la tension de seuil  $V_0$ ), le courant augmente de façon exponentielle.

En polarisation inverse, lorsque la tension est négative, le courant  $I_d$  reste très proche de zéro jusqu'à ce que la tension atteigne la tension de claquage  $V_A$ . À ce point, le courant peut augmenter rapidement, ce qui peut endommager la diode.

Modèles	Courbe caractéristique	Schéma électrique équivalent et état	Utilisation type
Réal		<p>D passante : <math>V_D &gt; 0</math>.</p> $I_D = I_S e^{\frac{qV_D}{k_B T}}$ <p>D bloquée : <math>V_D &lt; 0</math>.</p> $I_D = -I_S$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour déterminer le point de fonctionnement d'un circuit électrique.</li> </ul>
Semi réel (Avec seuil et résistance dynamique)		<p>D passante : <math>I_D &gt; 0</math>.</p>  $V_D = V_{Seuil} + R_D I_D$ $R_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} : \text{La résistance dynamique.}$ <p><math>V_{Seuil} = 0,6 \text{ à } 0,7V</math> pour une diode au Silicium.</p> <p><math>V_{Seuil} = 0,3V</math> pour une diode au Germanium.</p> <p>D bloquée : <math>V_D &lt; V_{Seuil}</math>.</p>  $I_D = 0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour l'étude dynamique des faibles signaux.</li> <li>• Analyse technique approfondie.</li> </ul>
Parfait (Avec seuil)		<p>D passante : <math>I_D &gt; 0</math>.</p>  $V_D = V_{Seuil} \cong 0,7V$ <p>D bloquée : <math>V_D &lt; V_{Seuil}</math>.</p>  $I_D = 0$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour calculer les courants et les tensions dans une maille.</li> <li>• Analyse technique simple.</li> </ul>

### 3.1.4 Droite de charge et point de fonctionnement de la diode :

La droite de charge représente le comportement d'un circuit électrique passif (résistance, inductance, etc.) connecté à une diode. Elle est tracée sur le graphe caractéristique courant-tension (I-V) de la diode. Le point de fonctionnement est le point d'intersection entre la droite de charge et la caractéristique I-V de la diode. Il représente les valeurs de tension ( $V_D$ ) et de courant ( $I_D$ ) dans le circuit en régime permanent.

Dans le circuit de la figure 3.5, la diode est alimentée par une tension continue  $V_e$  via une résistance R. Lorsque la tension  $V_e$  est appliquée, la diode permet le passage du courant dans une seule direction, tandis que la résistance R limite ce courant.

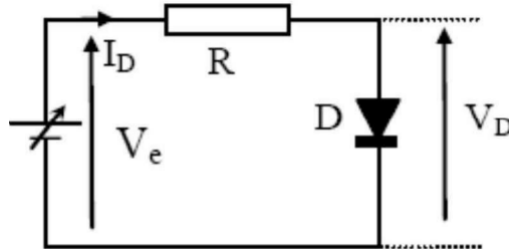


FIGURE 3.5 – Droite de charge

L'équation de la droite de charge :

$$V_e = RI_D + V_D \Rightarrow I_D = \frac{V_e - V_D}{R}$$

- Pour  $I_D = 0$  :  $V_D = V_e$
- Pour  $V_D = 0$  :  $I_D = \frac{V_e}{R}$

L'intersection de cette droite de charge avec la caractéristique directe de la diode permet de définir le point de fonctionnement de la diode (point M).

## 3.2 Thyristor

### 3.2.1 Définition

Le thyristor, un composant semi-conducteur, assez similaire à la diode à jonction, principalement utilisé pour convertir le courant alternatif en courant continu. Il permet le passage du courant dans une direction unique, de l'anode (A) vers la cathode (K). Néanmoins, une caractéristique distinctive du thyristor est sa troisième borne, nommée gâchette (G), ou 'gate' en anglais. Ce composant ne permet la conduction que lorsqu'il reçoit un courant minimal et positif à cette gâchette, agissant ainsi comme une diode dont le fonctionnement peut être contrôlé figure 3.6.

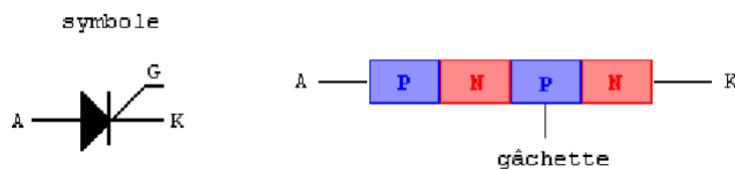


FIGURE 3.6 – Thyristor

### 3.2.2 Fonctionnement du thyristor

Le thyristor entre en état de conduction uniquement quand il est amorcé, par un courant appliqué à la gâchette. Pour amorcer le thyristor, il suffit d'activer brièvement l'interrupteur de commande, induisant ainsi un faible courant de gâchette. Une fois le thyristor est amorcé, il reste dans cet état de conduction, même si l'interrupteur est désactivé ultérieurement. Pour désamorcer le thyristor (état non conducteur), il faut réduire la tension entre l'anode et la cathode jusqu'à ce que le courant tombe en dessous du niveau de maintien nécessaire pour la conduction.

La figure 3.7 montre un circuit d'amorçage d'un thyristor. Le fonctionnement de ce circuit peut être décrit comme suit :

Lorsque l'interrupteur K1 est fermé, la tension (E) est appliquée à travers le circuit, permettant le courant



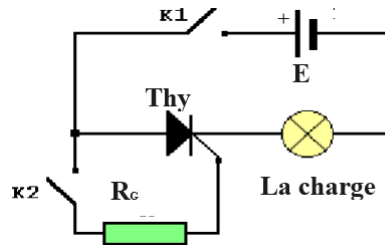


FIGURE 3.7 – Circuit d'amorçage du Thyristor

de circuler. La fermeture de K2 permet d'envoyer une impulsion de courant à travers  $R_C$  vers la gâchette du thyristor, le rendant conducteur. Le thyristor reste dans cet état tant que le courant dans le circuit principal est supérieur au courant de maintien.

### 3.3 Transistor bipolaire

#### Définition

Le transistor bipolaire est créé en juxtaposant trois couches de semi-conducteur dopés N+, P puis N pour le transistor NPN (courant dû à un flux d'électrons) ou dopés P+, N puis P pour le transistor PNP (courant dû à un flux de trous) figure 3.8.

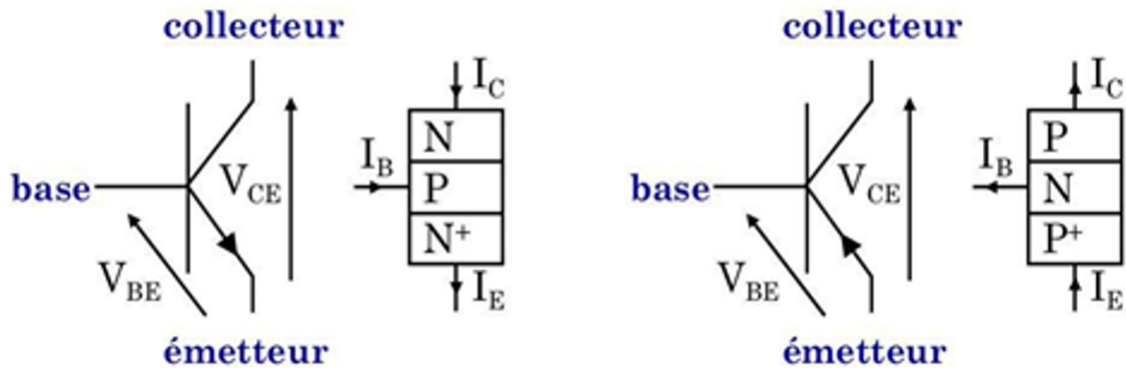


FIGURE 3.8 – Transistor bipolaire

#### Fonctionnement du transistor NPN

- Si la tension  $V_{BE}$  est suffisante, la diode BE (base –émetteur) est passante.
- Si la tension  $V_{CE}$  est suffisante, les électrons qui arrivent dans la base sont envoyés dans le collecteur. La diode CB est polarisée en inverse.
- Les trois courants du transistor bipolaire sont donc les suivants :
  - \* Courant de la base  $I_B$  : courant de trous de B vers E.
  - \* Courant de collecteur  $I_C$  : courant d'électrons de E vers C.
  - \* Courant de l'émetteur  $I_E$  : Courant d'électrons de B vers E + courant d'électrons de E vers C :  $I_E = I_B + I_C$ .

Le rapport,  $\beta$  (le gain du transistor), entre les courants  $I_C$  et  $I_B$  :  $I_C = \beta I_B$

Cela signifie que le courant pouvant circuler dans le collecteur du transistor est proportionnel au courant circulant dans la base.

#### Zones de fonctionnement du transistor

LA figure 3.10 illustre un montage à base du transistor. Les trois modes de fonctionnement sont :

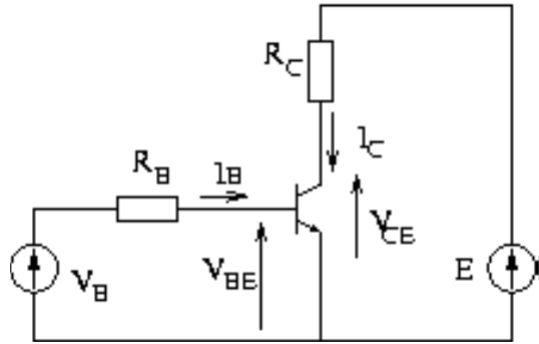


FIGURE 3.9 – Transistor bipolaire

a) **Zone de blocage :**

Pour  $V_B = 0, V_{BE} = 0$  et  $I_B = 0 \implies I_C = \beta I_B = 0$ .

La jonction CB est polarisée en inverse. Il existe donc un faible courant de fuite  $I_{CE0}$ .

On dit que le transistor est bloqué.

b) **Zone de saturation :**

Pour  $V_B > V_{seuil}$  de la jonction PN, on a :

$$V_B = R_B I_B + V_{BE} \implies I_B = \frac{V_B - V_{BE}}{R_B}$$

c) **Zone de fonctionnement linéaire :**

le courant de collecteur  $I_C$  est proportionnel au courant de base  $I_B$  par le facteur de gain en courant  $\beta$ .

$$I_C = \beta I_B$$

La tension  $V_{CE}$  n'est pas nulle et est généralement à une valeur intermédiaire entre 0V et la tension d'alimentation, ce qui permet au transistor d'agir comme un amplificateur.

### 3.4 Transistor MOS

#### définition

MOSFET est un acronyme pour « Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor ». Les MOSFET ou transistors MOS sont des transistors à effet de champ dont la grille métallique est totalement isolée du canal par une mince couche isolante d'oxyde de silicium ( $\text{SiO}_2$ ) d'épaisseur voisine de  $0,1 \mu\text{m}$ .

La grille, la couche de silice et le canal constituent un condensateur dont la polarisation peut modifier la conductivité du canal. Le changement peut résulter soit d'une modification de la concentration en porteurs majoritaires et l'on a des MOS à canal diffusé ou à déplétion, soit d'une modification de la concentration en porteurs minoritaires et l'on a alors des MOS à canal induit ou à enrichissement.

Pour ce type de transistors le courant d'entrée est nul puisque que la grille est isolée. La résistance d'entrée est toujours supérieure à  $1010 \Omega$ .

#### MOS à canal diffusé

Sur un substrat (B) dopé P sont diffusées deux zones très dopées N+ formant le drain et la source reliées par un canal dopé N. Il existe également des MOS avec un canal P et qui fonctionnent avec des tensions et des courants opposés à ceux ayant un canal N.

Sur le symbole utilisé pour la représentation des MOS à canal diffusé, le canal est représenté par un trait continu. Une flèche figure la jonction substrat-canal, elle est orientée dans le sens passant de la diode. Les quatre électrodes peuvent être accessibles mais le substrat et la source peuvent être reliés en interne. Pour les

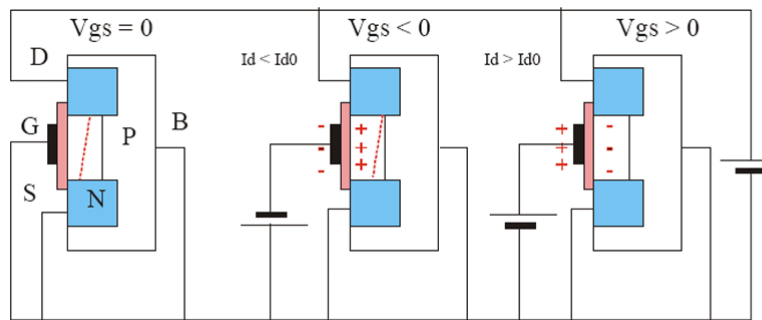


FIGURE 3.10 – Transistor MOS

tensions VGS positives, il y a un accroissement du nombre de porteurs libres dans le canal (enrichissement) et pour les tensions VGS négatives, on a un appauvrissement. L'expression du courant drain est comme pour un JFET donnée par : Mais cette fois VGS peut être positif ou négatif. La polarisation de ce type de transistor

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2$$

est particulièrement simple car on peut le polariser avec la grille à la masse ( $V_{GS} = 0$ ). On peut également utiliser les mêmes méthodes de polarisation que pour les JFET. Les applications de ce type de transistor sont les mêmes que celles des transistors à effet de champ à jonction. La polarisation de ce type de transistor est particulièrement simple car on peut le polariser avec la grille à la masse ( $V_{GS} = 0$ ). On peut également utiliser les mêmes méthodes de polarisation que pour les JFET. Les applications de ce type de transistor sont les mêmes que celles des transistors à effet de champ à jonction.

### MOS à canal induit

Pour ce type de transistor il n'y a pas de canal créé lors de la fabrication. Pour les tensions de grille  $V_{GB}$  négatives, la jonction drain-substrat est bloquée et le courant drain  $I_D$  est nul. Les seuls porteurs libres dans la zone P sont des électrons d'origine thermique. Si  $V_{GB}$  est assez positif, les charges négatives du matériau P se regroupent au voisinage de la grille et forment une couche conductrice entre le drain et la source. Cette couche se comporte comme une zone N qui est induite dans la zone P par inversion de la population des porteurs. La tension de seuil minimale pour induire un canal est notée  $V_{th}$  (th est mis pour threshold = seuil). Si  $V_{GB}$  croît au-delà du seuil, la section du canal augmente et  $I_D$  croît. Par construction le substrat est souvent relié à la source et  $V_{GB}$  est alors égal à  $V_{GS}$ . Sur le symbole des MOS à canal induit, le canal est représenté par un trait discontinu. Une flèche indique le sens pour lequel la jonction substrat-canal est passante. Il existe également des transistors complémentaires dans lesquels le canal induit est de type P[11,13].

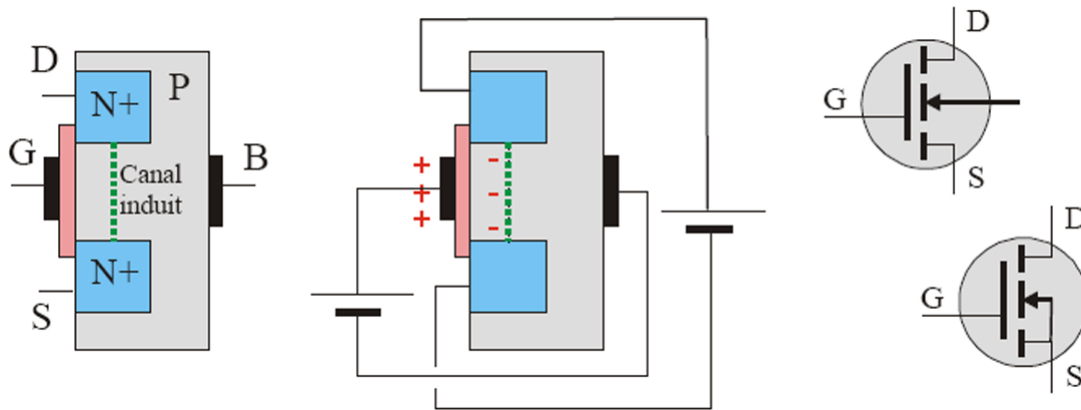


FIGURE 3.11 – Transistor MOS à canal induit

#### Avantages des transistors MOSFET

- Leur principal avantage est la résistance d'entrée qui est très grande  $R_e \approx 10^{12} \Omega$ . Pour un transistor à effet de champ à jonction, la résistance d'entrée est de l'ordre de  $10^8 \Omega$ .
- Le bruit intrinsèque est toujours très faible.
- Ce type de transistor est simple à fabriquer.
- La densité d'intégration autorisée par ce type de composant est très importante.

#### Inconvénients des transistors MOSFET

- La vitesse de commutation est plus faible que celle des transistors bipolaires.
- La pente est faible.
- La dispersion des paramètres est élevée.
- Il est nécessaire de prévoir une protection des entrées.

## Chapitre 4

# Conversion d'énergie

## 4.1 Applications des diodes

### 4.1.1 Introduction

Une des principales applications de la diode est le redressement de la tension alternative pour créer des générateurs de tension continue destinés à alimenter les montages électroniques. Diagramme bloc de la figure 4.1 montre le schéma d'un circuit d'alimentation DC.

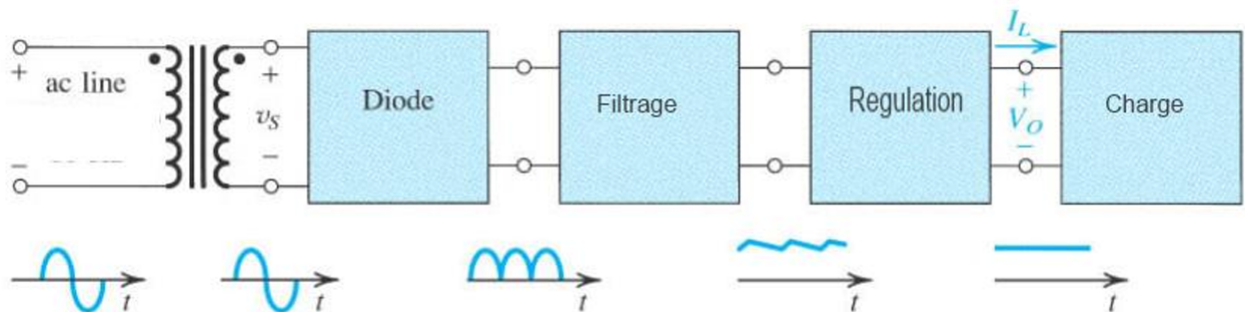


FIGURE 4.1 – Diagramme de bloc d'un circuit d'alimentation

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

- Transformateur.
- Redresseur.
- Filtre.
- Régulateur de tension.

### 4.1.2 Transformateur

Un transformateur sert à modifier la valeur efficace d'une tension alternative. Il peut l'abaisser ou l'élever. Il est constitué de 2 bobines de fil de cuivre isolé montées sur une armature en fer doux. La bobine d'entrée est appelée primaire, celle de sortie, secondaire. Les 2 bobines sont indépendantes. Il n'existe aucune liaison électrique entre elles 4.2.



FIGURE 4.2 – Transformateur

### 4.1.3 Redressement

#### Redressement simple alternance

Le redressement simple alternance permet de récupérer uniquement une seule alternance d'un signal bi-alternances. Considérons le schéma de la figure 4.3. dans lequel la tension  $e(t)$  varie sous la forme :

$$e(t) = E \sin(\omega t)$$

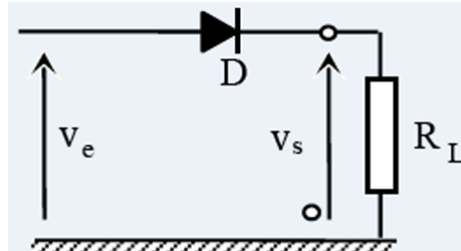


FIGURE 4.3 – Montage simple alternance

- \* Lorsqu'on applique un signal sinusoïdal à l'entrée d'un circuit redresseur mono-alternance, dès que la tension à l'entrée est positive, la diode conduit et le circuit équivalent dans ces conditions est donné par le schéma de la figure 4.4. Dans ces conditions la tension de sortie est identique à la tension appliquée à l'entrée :

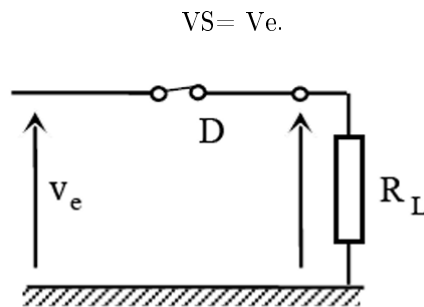


FIGURE 4.4 – Montage simple alternance (diode passante)

- \* Lorsque le signal appliqué à l'entrée est de polarité négative, la diode se bloque et le circuit équivalent au circuit de redressement est donné par la figure 4.5 . On constate que la résistance de charge  $R_L$  n'est parcourue par aucun courant :

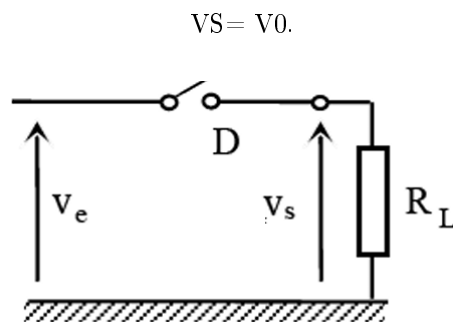


FIGURE 4.5 – Montage simple alternance (diode bloquée)

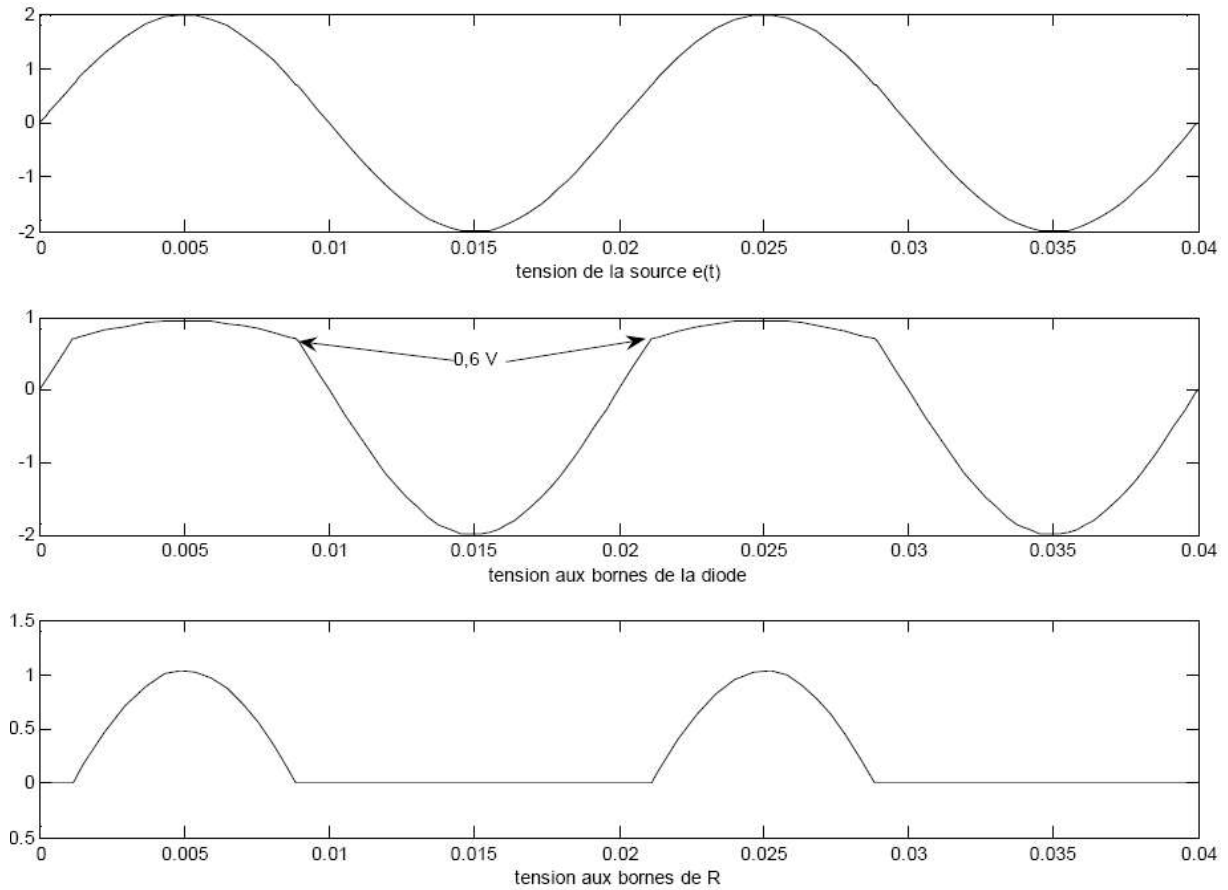


Fig. 06

### Tension moyenne

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} e(\theta) d\theta$$

$$U_{moy} = \frac{E}{\pi}$$

### Tension efficace

$$U_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u^2(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} e^2(\theta) d\theta$$

$$U_{eff} = \frac{E}{2}$$

**Le taux d'ondulation  $\tau$**  : c'est le rapport de la valeur efficace de l'ondulation à la valeur moyenne de la grandeur.



$$\tau = \frac{v_{effond}}{v_{moy}}$$

**Le facteur de forme F** : c'est le rapport de la valeur efficace de la grandeur à sa valeur.

$$F = \frac{v_{eff}}{v_{moy}}$$

On donne la relation suivante :

$$U_{eff}^2 = U_{moy}^2 + U_{ondeff}^2$$

Et on peut tirer la relation suivante entre F et  $\tau$ .

$$F = \sqrt{\tau^2 + 1}$$

Pour le redressement simple alternance, on a :

$$F = \frac{\frac{E}{2}}{\frac{E}{\pi}} = \frac{\pi}{2} = 1.57 \quad \tau = \sqrt{F^2 - 1} = 1.21$$

## 3.2 Redressement double alternance

### 3.2.1 Avec transformateur à point milieu

Dans le montage de la figure 07, on applique aux bornes de l'enroulement primaire du transformateur une tension sinusoïdale  $e(t) = E \sin \omega t$ . Le secondaire à point milieu du transformateur est constitué par deux enroulements symétriques délivrant entre leurs bornes deux tensions  $v_1$  et  $v_2$  en opposition de phase :  $v_1(t) = -v_2(t) = V_m \sin \omega t$ .

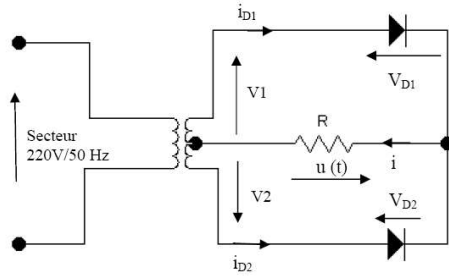


Fig. 07

- pour l'alternance positive de  $e(t)$  (figure 08) :

$$u(t) = v_2(t) = -v_1(t)$$

$$i(t) = i_{D1}$$

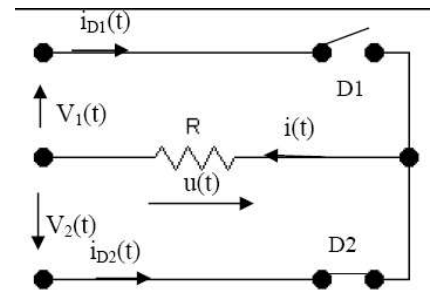


Fig. 08

- pour l'alternance négative de  $e(t)$  (figure 09) :

$$u(t) = v_2(t) = -v_1(t)$$

$$i(t) = i_{D2}(t)$$

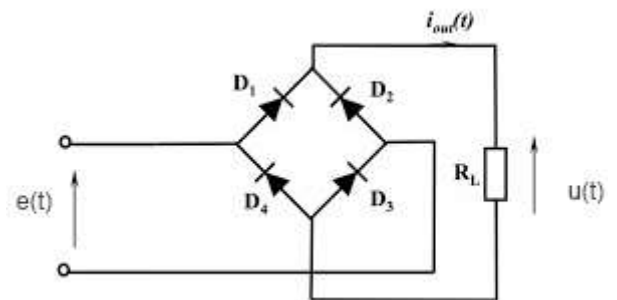


Fig. 09

### 3.2.2 Redressement avec pont de Graëtz

Le pont de Graëtz est constitué de 4 diodes, c'est un type de redressement très utilisé. Le montage est présenté sur la figure 10.

Pendant l'alternance positive de la tension d'entrée  $e(t)$ , D1 et D3 conduisent ( D2 et D4 sont bloquées ), et quand elle est négative, D2 et D4 conduisent (D1 et D3 sont bloquées). Le courant dans la charge est toujours orienté dans le même sens (figure 11).

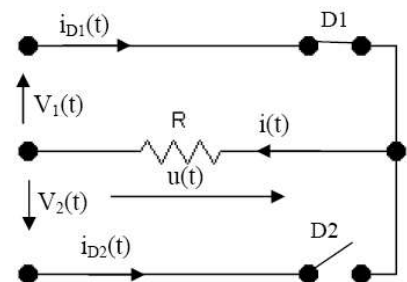


Fig. 10

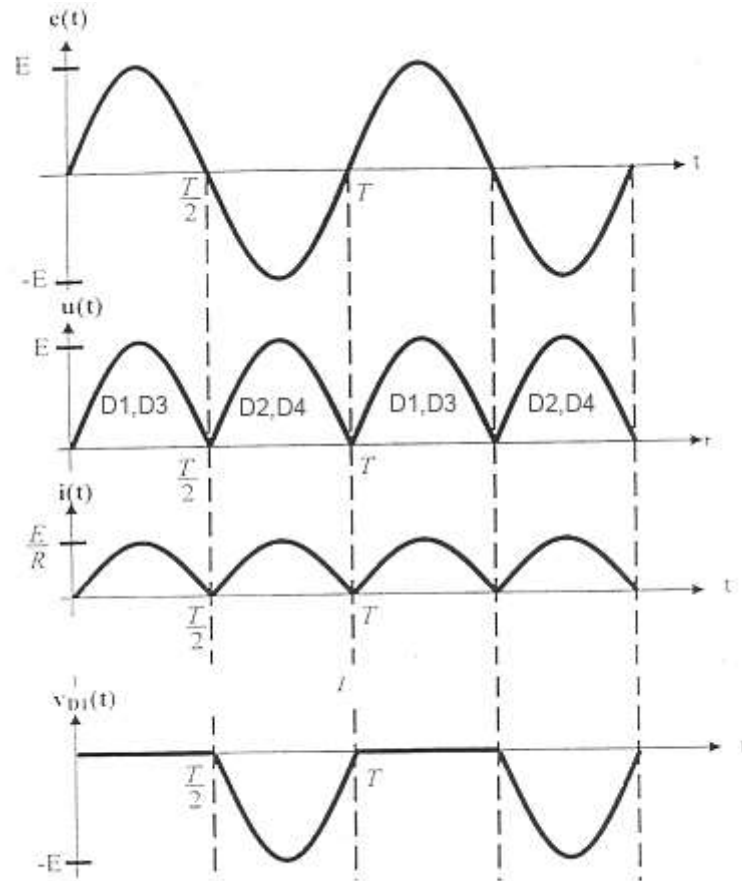


Fig. 11

### Tension moyenne

$$\overline{U_{moy}} = \frac{2}{T} \times \int_0^{T/2} u_s(t) dt = \frac{2}{T} \times \int_0^{T/2} U_{\max} \times \sin(\omega \times t) dt \quad \text{Or} \quad \theta = \omega \times t \Rightarrow d\theta = \omega \times dt \Rightarrow dt = \frac{d\theta}{\omega}$$

$$\overline{U_{moy}} = \frac{2}{\omega \times T} \times \int_0^{\pi} U_{\max} \times \sin(\theta) d\theta = \frac{2 \times U_{\max}}{2 \times \pi} \times \int_0^{\pi} \sin(\theta) d\theta = \frac{U_{\max}}{\pi} \times [-\cos(\theta)]_0^{\pi}$$

$$\overline{U_{moy}} = \frac{2 \times U_{\max}}{\pi} \quad \text{Et} \quad \overline{I_{moy}} = \frac{\overline{U_{moy}}}{R} = \frac{2 \times I_{\max}}{\pi}$$

### Tension efficace

$$U_{eff}^2 = \frac{2}{T} \times \int_0^{T/2} u_s^2(t) dt = \frac{2}{T} \times \int_0^{T/2} U_{max}^2 \times \sin^2(\omega \times t) dt = \frac{2 \times U_{max}^2}{\omega \times T} \times \int_0^{\pi} \sin^2(\theta) d\theta$$

$$U_{eff}^2 = \frac{2 \times U_{max}^2}{2 \times \pi} \times \int_0^{\pi} \frac{1 - \cos(2 \times \theta)}{2} d\theta = \frac{U_{max}^2}{2 \times \pi} \times \left[ \theta - \frac{\sin(2 \times \theta)}{2} \right]_0^{\pi} = \frac{U_{max}^2}{2}$$

Donc 
$$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \quad \text{et} \quad I_{eff} = \frac{U_R}{R} = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$$

**Le facteur de forme F :**

$$F = \frac{U_{eff}}{U_{moy}} = \frac{\frac{U_{max}}{\sqrt{2}}}{\frac{2 \times U_{max}}{\pi}} \Rightarrow F = \frac{\pi}{2 \times \sqrt{2}} = 1,11$$

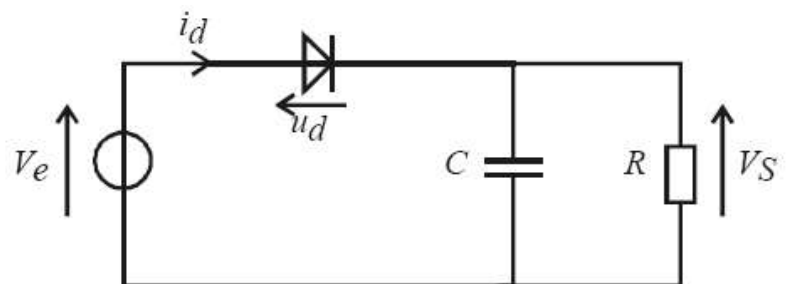
**Le taux d'ondulation  $\tau$  :**

$$\tau = \sqrt{F^2 - 1} \quad \Rightarrow \tau = 0,48$$

#### 4- Filtrage

Le redressement double alternance à pont de diodes permet d'obtenir un courant, qui a toujours le même sens, mais n'est pas d'intensité constante. Le

filtrage consiste à essayer d'obtenir une tension constante que possible. Le dispositif le plus simple consiste à brancher un condensateur en parallèle avec la charge comme indiqué sur la figure 12 pour un redressement mono alternance.



Lorsque la tension d'entrée  $V_e$  est supérieure à la tension de la cathode, D est passante et le condensateur se charge à travers D. Lorsque la tension  $V_e$  baisse à nouveau, le condensateur est chargé donc la tension de cathode est supérieure à la tension de l'anode et la diode se bloque. Le condensateur se décharge alors dans le circuit de charge (la figure 13).

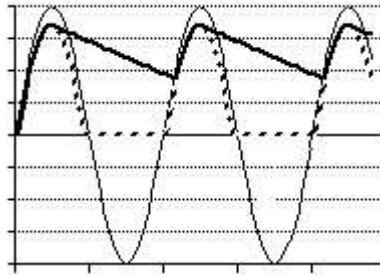


Fig. 13

### Calcul du condensateur de filtrage

On considère que le condensateur C se décharge à courant  $I_{\max}$  constant pendant un temps  $\Delta T$  et que la chute de sa tension est inférieure à  $\Delta V$ .

On a alors la relation:

$$C \times \Delta V = I_{\max} \times \Delta T$$

Donc

$$C = \frac{I_{\max}}{f \cdot \Delta V}$$

Pour un redressement double alternance, La formule de calcul du condensateur devient donc :

$$C = \frac{I_{\max}}{2 \cdot f \cdot \Delta V}$$

### Exemple :

On réalise une alimentation continue dont la tension de sortie est égale à 20 V. Elle peut délivrer un courant maximum de 100 mA. Déterminons la valeur du condensateur de filtrage afin d'obtenir une ondulation crête à crête de  $\Delta V = 1$  V (aux bornes du condensateur).

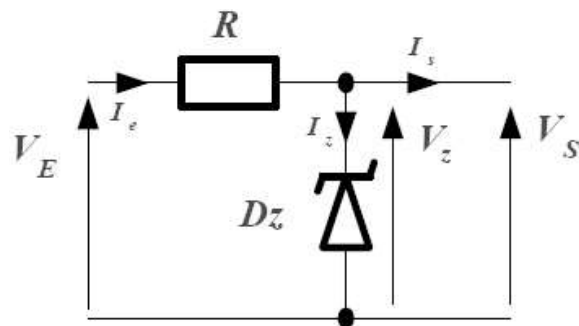
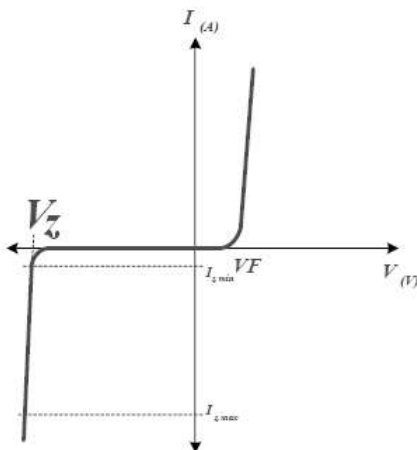
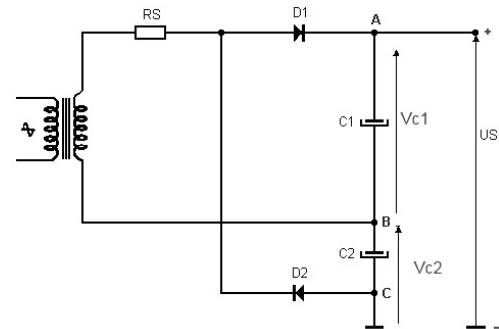
Le courant fourni par le condensateur dans sa phase de décharge est voisin de  $I_{\max}$ . La formule de C permet d'écrire :

$$C = \frac{I_{\max}}{2 \cdot f \cdot \Delta V} = \frac{0,1}{2 \cdot 50 \cdot 1} = 1mF = 1000\mu F$$

### 5- Stabilisation par diode zener.

### 5.1 Caractéristique

Cette diode fonctionne comme une diode classique, avec comme seule différence sa tension inverse. En effet celle-ci est appelée la tension de zener  $V_z$ . Dans le sens direct, une diode zener se comporte comme une diode de redressement. En sens inverse, le courant reste nul jusqu'à la tension  $V_z$ , puis cette tension reste pratiquement indépendante de la tension.



**Choix des composants :**

$$R \leq \frac{V_{E\min} - V_z}{i_{s\max} + I_{z\min}}$$

## 6- Autres applications des diodes

### 6.1 Doubleurs de tension

Le mécanisme de fonctionnement est le suivant (figure 15) :

**Lors de l'alternance positive :** D1 conduit, alors que D2 est bloqué. Le condensateur électrochimique C1 se charge, le courant circulant à travers D1 - C1 et retournant au secondaire par le point B (sens conventionnel).

La tension continue entre A et B est  $V_{c1}$

**Lors de l'alternance négative :** D1 est bloqué, alors que D2 conduit. Le condensateur électrochimique C2 se charge, le courant circulant du point B vers C2 et retournant au secondaire, par l'intermédiaire de D2 (sens conventionnel).

La tension continue de pointe entre B et C est alors **Vc2** :

Les condensateurs C1 et C2 étant reliés en série, la tension continue entre A et C est de :

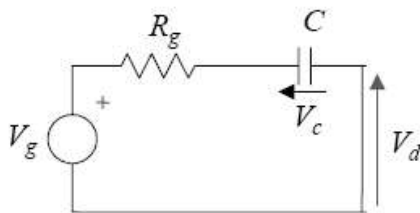
$$V_S = V_{c1} + V_{c2}$$

Les composants C1 et C2 se comportent donc comme deux générateurs de tension continue en série.

### 6.2 Restitution d'une composante continue (clamping) :

Décaler le signal vers les tensions positives (ou négatives). Reconstitution d'une composante continue (valeur moyenne) non nulle

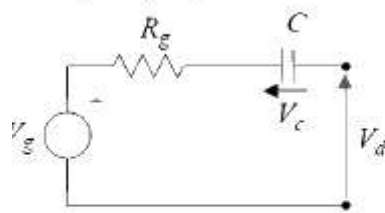
Lorsque  $V_g - V_c > 0$ , la diode est passante



⇒ C se charge et  $V_c$  tend vers  $V_g$

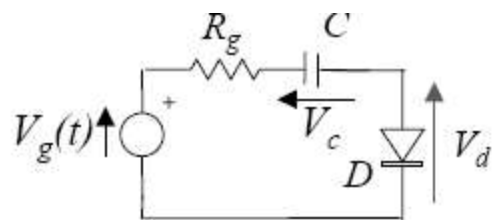
⇒  $V_d = 0$

Lorsque  $V_g - V_c < 0$ , la diode est bloquée



$V_c = \text{constant}$  (C ne peut se décharger)

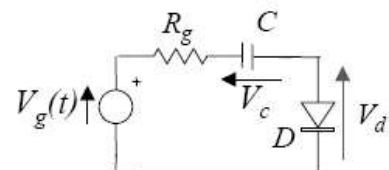
$V_d = V_g + V_c$   
 ⇒ - composante continue

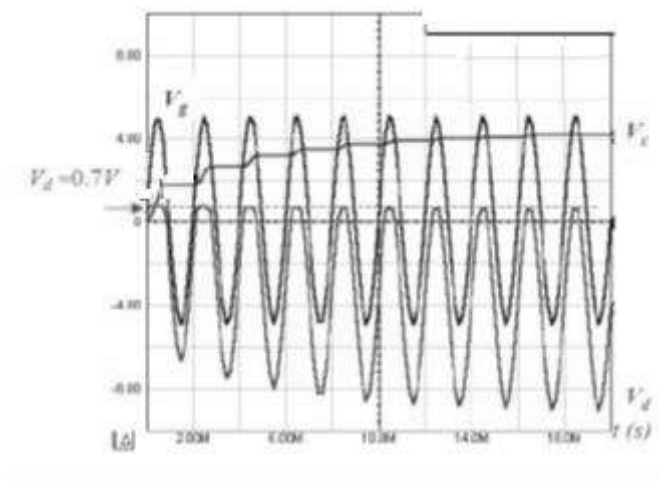


**Cas particulier :**

$$V_g = V_m \sin(\omega \cdot t) \text{ pour } t > 0$$

$$V_c = 0 \text{ pour } t < 0 \text{ (C déchargé)}$$

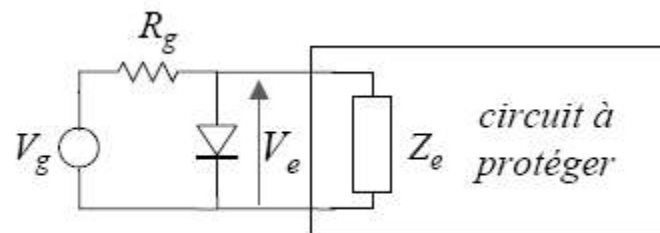




$$\begin{aligned}
 C &= 1\mu F \\
 R_g &= 1k\Omega \\
 f &= 100\text{Hz} \\
 V_m &= 5\text{V}
 \end{aligned}$$

### 6.3 Limiteur de crête (clipping)

Fonction : Protéger les circuits sensibles (circuits intégrés, amplificateur à grand gain...) contre une tension d'entrée trop élevée ou d'une polarité donnée [8].



Quand  $V_g(t) > V_0 = 0.7\text{V}$  :  $V_e \cong V_0$

Quand  $V_g(t) \leq V_0$  :  $V_e \cong \frac{Z_E}{Z_E + R_g} V_g$

Protection contre les tensions supérieures à 1V.



## Chapitre 5

# Amplificateur linéaire

## 5.1 Amplificateur linéaire

### 5.1.1 Principales caractéristiques

Un Amplificateur Opérationnel (ou un Amplificateur Linéaire Intégré : ALI) permet d'amplifier la différence de potentiel  $e$  entre les 2 tensions d'entrées [14] :

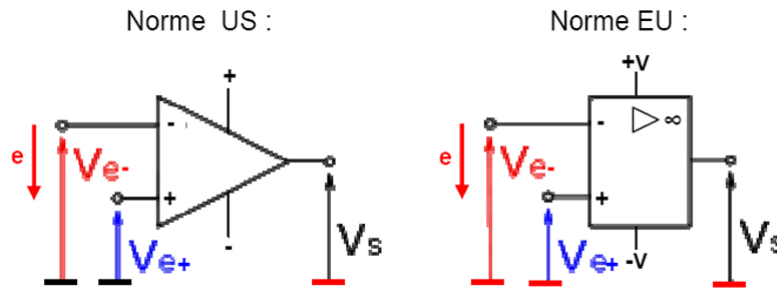


FIGURE 5.1 – Amplificateur Opérationnel

Soit  $e$  la tension différentielle d'entrée du montage avec :  $e = V_{e+} - V_{e-}$

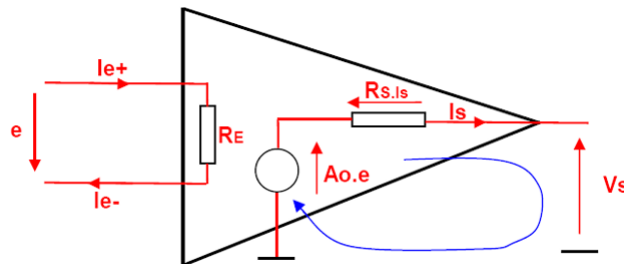


FIGURE 5.2 – Schéma équivalent

$R_E$  = Résistance d'entrée de l'AOP  $\approx \infty$  ;  $I_{e+} = I_{e-} \approx 0$

$R_S$  = Résistance de sortie de l'AOP  $\approx 0$  ;  $R_S I_S \approx 0$  ;  $V_S = A_o \cdot e$

$A_o$  est le gain en boucle ouverte de l'AOP

### 5.1.2 Fonctionnement des amplificateurs opérationnels

#### L'amplificateur opérationnel idéal

Un amplificateur est considéré comme idéal si l'on peut admettre que son gain est infini, que ses impédances d'entrée sont infinies ( $Z_E = \infty$ ) et que sa résistance de sortie est nulle ( $Z_S = 0$ ).

$$\begin{aligned} V^+ - V^- &= e = 0 \\ I^+ - I^- &= 0 \end{aligned}$$

#### L'amplificateur opérationnel réel

- Le gain de l'amplificateur opérationnel est fini et fonction de la fréquence du signal. Le gain du système ne dépend pas uniquement de la boucle de réaction.
- L'amplificateur contient des générateurs de tension et de courant parasites qui modifient la tension de sortie.
- La bande passante est limitée et dépend du gain du système bouclé.
- L'amplificateur ne peut délivrer en sortie qu'une puissance limitée.
- Du fait de ces imperfections, le fonctionnement d'un amplificateur réel diffère de celui d'un amplificateur idéal dans un certain nombre de domaines.

#### applications des amplificateurs opérationnels

	<p style="text-align: center;"><b>Soustracteur</b></p> $V_+ = V_2 \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$ $V_- = \frac{\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_s}{R_2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} = \frac{V_1 R_2 + V_s R_1}{R_2 + R_1} = \frac{V_1 R_2 + V_s R_1}{R_1 + R_2}$ <p>or <math>V_+ = V_- \Rightarrow \frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{V_1 R_2 + V_s R_1}{R_1 + R_2}</math></p> $\Leftrightarrow \frac{V_s R_1}{R_1 + R_2} = (V_2 - V_1) \frac{R_2}{R_1 + R_2}$ $\Leftrightarrow V_s = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1)$
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p style="text-align: center;"><b>Sommeur</b></p> $V_- = V_+ = 0 \text{ V}$ $I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = I$ $\Leftrightarrow \frac{V_1}{R} + \frac{V_2}{R} + \frac{V_3}{R} + \dots + \frac{V_n}{R} = -\frac{V_s}{R}$ $\Rightarrow V_s = -(V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n)$
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p style="text-align: center;"><b>Integrateur</b></p> $V_\epsilon = R \cdot I \Rightarrow I = \frac{V_\epsilon}{R}$ $V_s = -\frac{1}{C} \int i \, dt = -\frac{1}{RC} \int V_\epsilon \, dt$
--	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

	<p style="text-align: center;"><b>Derivateur</b></p> $I = C \frac{dV_\epsilon}{dt}$ $V_s = -R \cdot I = -RC \frac{dV_\epsilon}{dt}$
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

# Références

# Références

## Références

1. Bouteille, F., & Destombes, T. (2001). *Electronique, Tome 1, Manipulations et simulations*. Dunod.
2. Chelb, H. (n.d.). *Cours d'électronique, diode à jonction*. ISET.
3. Chelb, H. (n.d.). *Cours d'électronique, utilisation de la diode*. ISET.
4. Floyd, L. (2000). *Electronique: composants et systèmes d'application*. Dunod.
5. Haraoubia, B. (2006). *Electronique générale* (3ème éd.). Editions, Office des Publications Universitaires (OPU).
6. Heiser, T. (n.d.). *Cours d'Electronique Analogique*. [www-phase.c-strasbourg.fr/EA2004](http://www-phase.c-strasbourg.fr/EA2004).
7. Horowitz, P., & Hill, W. (1996). *Traité de l'électronique analogique et numérique Vol.1*. Elektor.
8. Malvino, A. P. (2000). *Principes d'électronique*. Edition Science.
9. Manneville, F., & Esquieu, J. (2000). *Electronique- cours et exercices corrigés*. Dunod.
10. Roux, Ph. (2002). *Théorie générale simplifiée des semi-conducteurs jonction pn au silicium effet transistor bipolaire*. Dunod.
11. *Cours montage émetteur commun*. (n.d.). [www.ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/cours/emetcom.pdf](http://www.ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/cours/emetcom.pdf).
12. *Cours Jfet*. (n.d.). [www.ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/cours/Jfet.pdf](http://www.ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/cours/Jfet.pdf).

13. *Cours semi-conducteur*. (n.d.). [www.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/cours/semicon.pdf](http://www.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/cours/semicon.pdf).
14. *Cours sur les amplificateurs opérationnels, Sciences de l'ingénieur, B3, 1-9*.