

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

## ***Polycopié de Cours***

2<sup>ème</sup> Année classes préparatoires en Sciences et Technologie

(Semestre 4)

## **Electronique Générale (UEF223)**

*Dr. BENOUAR*

*Ali*

*Maître de conférences classe B*

*Dr. AHMED BACHA*

*Reda*

*Maître de conférences classe B*

## SOMMAIRE

Sommaire .....	I
Objectifs.....	IV

### LES SEMI-CONDUCTEURS

Conduction électrique .....	01
Structure de l'atome.. .....	02
Structure d'un cristal.....	03
Semi-conducteur pur (Intrinsèque) .....	03
Concentration intrinsèque ni des électrons et des trous dans le silicium pur.....	03
Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques.....	05
Dopage de type N.....	05
Dopage de type P.....	06

### LA JONCTION PN

Principe de fonctionnement.....	07
Jonction P-N polarisée en inverse.....	08
Jonction P-N polarisée en direct.....	08
Caractéristiques courant-tension.....	08

### LA DIODE

Présentation .....	09
Symbolisation.....	09
Fonctionnement.....	09
Schéma équivalent (Modèles électriques) .....	10
Modélisation n°1 : la diode « idéale » .....	11
Modélisation n°2 : diode avec seuil.....	11
Modélisation n°3 : diode avec seuil et résistance.....	11
Caractéristiques courant-tension.....	11
Droite de charge et point de fonctionnement.....	11
Résistance dynamique.....	12

### APPLICATIONS DES DIODES

Introduction.....	13
Transformateur.....	13

Redressement.....	14
Redressement simple alternance.....	14
Redressement double alternance.....	16
Avec transformateur à point milieu.....	16
Redressement avec pont de Graëtz.....	17
Filtrage.....	19
Stabilisation par diode zener. ....	21
Caractéristique.....	21
Autres applications des diodes.....	22
Doubleurs de tension.....	22
Restitution d'une composante continue (clamping) .....	22
Limiteur de crête (clipping) .....	23
Restitution d'une composante continue (clamping) .....	22
Différents types de la diode .....	24
Diode varicap .....	24
Diodes électroluminescentes (LED) .....	24
La diode Schottky .....	24

### **TRANSISTOR BIPOLAIRE**

Introduction.....	25
Fonctionnement transistor NPN.....	25
Les zones de fonctionnement du transistor.....	26
Zone de blocage.....	26
Zone de saturation.....	26
Zone de fonctionnement linéaire.....	26

### **POLARISATION DE TRANSISTOR BIPOLAIRE**

Introduction.....	27
Montages de la polarisation.....	27
Polarisation par résistance de base.....	27
Polarisation par réaction d'émetteur.....	28
Polarisation par réaction de collecteur.....	28
Exemple.....	28

### **TRANSISTOR BIPOLAIRE EN REGIME VARIABLE**

Paramètres hybrides .....	30
Schéma équivalent.....	31
Exemple du transistor en régime variable.....	31
Transistor bipolaire en commutation.....	32

## LE TRANSISTOR À EFFET DE CHAMP

Structure.....	33
Symboles, tensions et courants.....	33
Fonctionnement.....	34
Réseaux de caractéristiques.....	35
Réseau d'entrée.....	35
Réseau de sortie.....	35
Réseau de transfert.....	36
Polarisation des transistors à effet de champ.....	36

## TRANSISTORS MÉTAL OXYDE (MOSFET)

Structure.....	37
MOS à canal diffusé.....	37
Structure et fonctionnement.....	37
MOS à canal induit.....	38
Structure et fonctionnement.....	38
Avantages des transistors MOSFET.....	39
Inconvénients des transistors MOSFET.....	39

## L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL

Principales caractéristiques.....	40
Fonctionnement des amplificateurs opérationnels.....	40
L'amplificateur opérationnel idéal.....	40
L'amplificateur opérationnel réel.....	41
applications des amplificateurs opérationnels.....	42
References.....	43

## **Objectifs**

- Donner les fondements de l'électronique.
- Apprendre les notions théoriques.
- Apprendre à analyser des circuits électroniques.
- Se familiariser avec certaines applications importantes en électronique.

## Les semi-conducteurs

### 1. Conduction électrique

Dans le modèle classique, un corps est isolant s'il ne contient pas d'électrons mobiles. Dans un conducteur, des électrons sont peu liés aux noyaux et peuvent se déplacer dans le réseau cristallin.

Si  $n$  est la densité des électrons libres,  $v$  leur vitesse moyenne, dans une barre de longueur  $L$ , de section  $S$  avec une tension  $V$  entre les extrémités, la densité de courant  $J = I/S$  est égale à  $J = n.e.v$ .

La vitesse des électrons est proportionnelle à la force à laquelle ils sont soumis donc au champ électrique  $E = V/L$ .

Si  $\mu$  désigne la mobilité, on a :  $v = \mu.E$  ;  $J = n.e.\mu.E = \sigma.E = E/\rho$  [1-2]

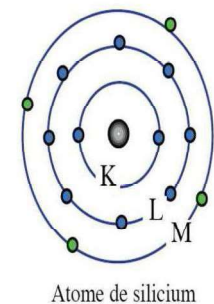
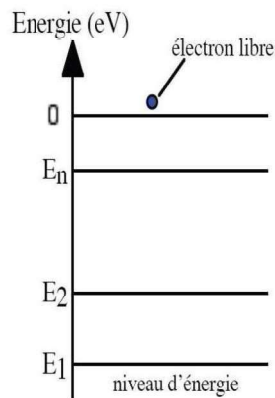
### 2. Structure de l'atome

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons de charge électrique  $q$  négative ( $-1.6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb). Le noyau contient deux types de particules:

- Les neutrons qui ne sont pas chargés
- Les protons qui portent une charge électrique  $+q$ .

L'atome étant électriquement neutre, le nombre de protons est égal au nombre d'électrons. Les électrons d'un atome gravitent autour du noyau sont assujettis à occuper des niveaux d'énergie discrets  $E_1, E_2, \dots, E_n$ , définissant chacun une couche

électronique. Plus le niveau est élevé, plus la couche qui lui correspond est éloignée du noyau. Si l'on choisit comme origine énergétique ( $E = 0$  eV) celle d'un électron soustrait à l'influence du noyau (c'est-à-dire porté à une distance infinie), toutes les valeurs des niveaux d'énergies  $E_n$  sont négatives (1eV représente  $1.6 \cdot 10^{-19}$  Joule). Cela se traduit par le fait qu'il faut produire un travail pour éloigner un électron [3].



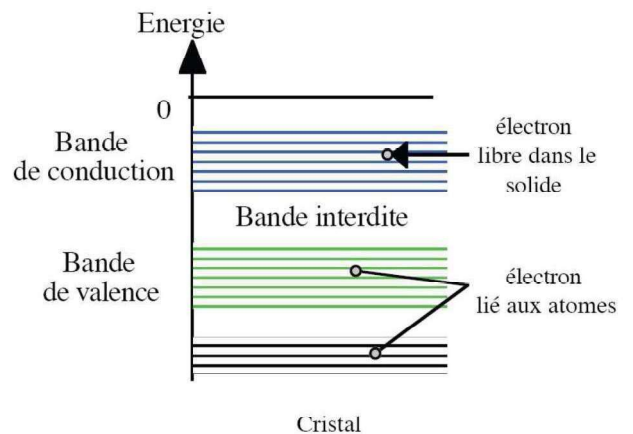
On distingue :

- Les électrons internes qui occupent les premières couches. Ils sont alors très fortement liés au noyau.
- Les électrons de valence (ou périphériques) qui occupent la couche la plus externe. Ces électrons de valence sont peu liés au noyau.

Considérons un atome de silicium qui possède 14 électrons ( $Z = 14$ ). Ces électrons sont répartis sur trois couches électroniques :

- K (2 électrons)
- L (8 électrons)
- M (4 électrons)

Contrairement aux deux premières, la dernière couche (M) est incomplète, elle peut accueillir 4 électrons supplémentaires. En effet, Il faut savoir que tous les atomes tendent à avoir huit électrons sur leur couche périphérique [3].



### 3. Structure d'un cristal

Un cristal est constitué d'un ensemble d'atomes dont les noyaux sont répartis dans l'espace de façon régulière. La cohésion des atomes est assurée par la mise en commun des électrons de valence pour former des liaisons dites de covalence

Les états énergétiques possibles des électrons du cristal sont représentés par un diagramme analogue à celui de l'atome. Mais du fait de l'interaction des atomes entre eux, les niveaux d'énergie se transforment en bandes d'énergie séparées par des bandes interdites (où il n'y a pas d'états permis).

Comme dans le cas de l'atome, le nombre d'électrons susceptibles d'occuper une bande d'énergie est limité et les électrons du solide combleront en priorité les états d'énergie les plus faibles.

Un électron dont l'énergie est située dans une bande en dessous de la bande de valence est lié à un atome donné du solide. Par contre, un électron de la bande de valence est commun à

plusieurs atomes. La bande située au-dessus de la bande interdite s'appelle la bande de conduction.

L'électron dont l'énergie se situe dans bande de conduction circule librement dans le solide. C'est un porteur de charge qui participe à l'écoulement du courant dans le solide lorsque ce dernier est soumis à une différence de potentiel (qui produit un champ électrique). Chaque type de matériau présente une hauteur de bande interdite qui lui est propre, cette différence d'énergie, qui joue un rôle fondamental, permet de distinguer les matériaux isolants, semi-conducteurs et conducteurs [3].

#### 4. Semi-conducteur pur (Intrinsèque)

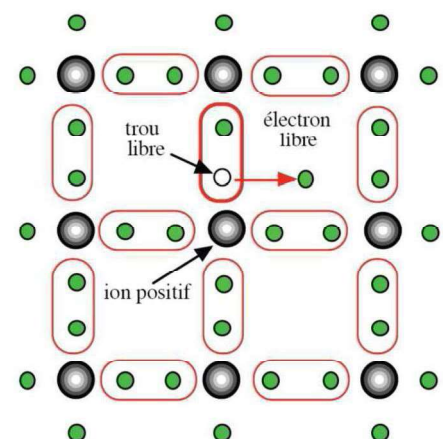
Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsque le cristal n'est pas pollué (volontairement ou non) par des impuretés pouvant changer la concentration en porteurs libres. Pour une température différente de 0 K, des électrons peuvent devenir libres c'est à dire passer de la bande de valence à la bande de conduction, où leur concentration est notée  $n$ . Ces électrons laissent des trous dans la BV (avec une concentration notée  $p$ ) eux-aussi libres de se déplacer avec, de plus, une égalité entre les concentrations  $n$  et  $p$ .

##### 4.1 Conduction par électron et par trou

Si une liaison de valence est brisée (agitation thermique, photon ...) l'électron devient mobile : il laisse un excès de charge positive le « trou » (symbolisé par un  $+$ ). Cette lacune va être comblée par un électron voisin libéré par agitation thermique et qui va à son tour laisser un trou : ceux-ci semblent se déplacer dans le réseau. Aux électrons (masse positive, charge négative) correspondent des trous (masse négative, charge positive). Le déplacement des trous étant un processus à deux étapes, leur mobilité dans le réseau est plus faible que celle des électrons.

Trous et électrons constituent les porteurs libres intrinsèques dont le nombre est fonction de la température. La neutralité électrique du matériau impose que les trous et les électrons soient en nombres identiques ( $n_i$  et  $p_i$ ) [2].

##### 4.2 Concentration intrinsèque $n_i$ des électrons et des trous dans le silicium pur





On définit une concentration intrinsèque  $n_i$  (égale aux concentrations  $n$  et  $p$ ) pour laquelle on montrera plus loin qu'elle est donnée par la relation :

$$n = p = n_i = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2KT}\right)$$

Où  $A$  est une constante spécifique du matériau.

Les concentrations par unité de volume ( $\text{cm}^3$ ),  $n$  en électrons libres dans la bande de conduction et  $p$  en trous libres dans la bande de valence sont égales à  $n_i$  : la concentration intrinsèque. La mécanique statistique montre que la population des porteurs libres ( $n$  électrons. $\text{cm}^{-3}$ ) dans la bande de conduction et ( $p$  trous. $\text{cm}^{-3}$ ) dans la bande de valence s'exprime selon :

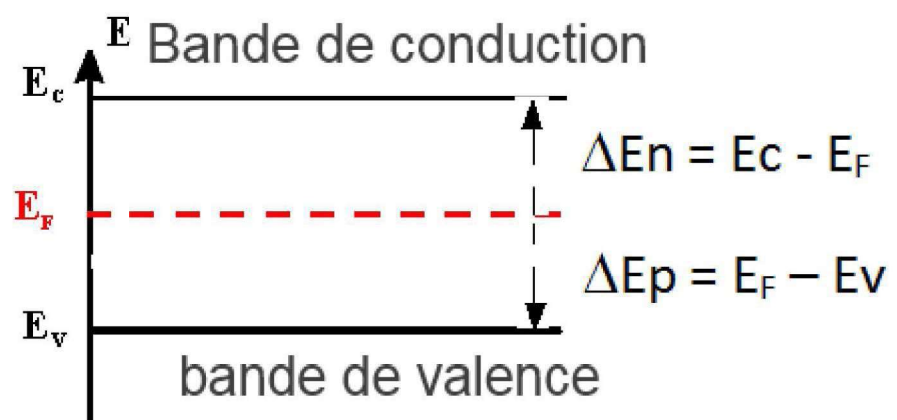
$$n = N_c \exp\left(-\frac{\Delta E_n}{KT}\right)$$

$$p = N_v \exp\left(-\frac{\Delta E_p}{KT}\right)$$

Où  $N_c$  et  $N_v$  sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction ( $2.82 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  à  $300^\circ\text{K}$  pour Si) et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence ( $1.83 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  à  $300^\circ\text{K}$  pour Si). Ces deux coefficients évoluent avec la température selon une loi en  $T^{3/2}$ .  $\Delta E_p$  et  $\Delta E_n$  représentent deux différences d'énergies liées à un niveau de Fermi  $E_F$  qui indique les écarts de population entre les électrons et les trous.  $k$  : constante de Boltzmann  $8,6 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$ .  $T$  : température absolue en  $^\circ\text{K}$ .

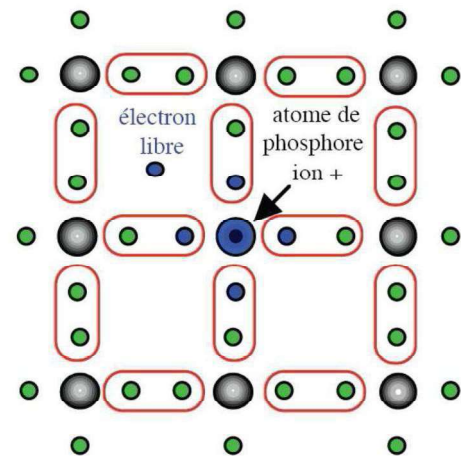
Pour le silicium intrinsèque à  $300 \text{ K}$ , où les populations  $p$  et  $n$  sont égales à  $n_i$ , on montre que le niveau de Fermi  $E_{Fi}$  est pratiquement situé au milieu de la bande interdite. En effet : la différence ( $\Delta E_n - \Delta E_p$ ) ( $11.2 \text{ meV}$ ) est négligeable devant la hauteur de bande interdite ( $\Delta E_p + \Delta E_n$ ) égale à  $1.12 \text{ eV}$ .

La concentration intrinsèque  $n_i$  en électrons libres et en trous libres dépend de la hauteur de bande interdite  $E_G$  et de la température  $T$  [3].



## 5. Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques

Dans un matériau pur, on introduit des impuretés par dopage. Pour que celui-ci soit contrôlable, il faut que le degré de pureté initial global soit supérieur au taux du dopage. Les taux de dopage utilisés sont de l'ordre de  $10^{-8}$  à  $10^{-11}$ . Une mole de silicium (28 g) correspond à  $6,023 \cdot 10^{23}$  atomes et la densité du silicium est voisine de  $7 : 1 \text{ cm}^3$  de silicium contient donc environ  $1,5 \cdot 10^{23}$  atomes. Avec un taux de dopage de l'ordre  $10^{-10}$ , il y a environ  $1,5 \cdot 10^{13}$  atome d'impureté par  $\text{cm}^3$  [2]



### 5.1 Dopage de type N

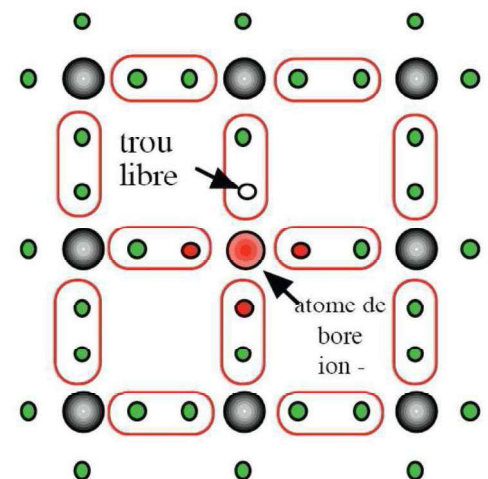
On obtient un semi-conducteur de type N en dopant le cristal de silicium avec des atomes possédant 5 électrons sur leur couche de valence. On utilise ainsi le phosphore (ou l'arsenic).

Quatre de ces cinq électrons de valence du phosphore sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons de covalences. Le 5<sup>e</sup> électron, inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent. Une très faible énergie suffit pour le libérer et il se retrouve "libre" dans la bande de conduction. L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes donneurs sont ionisés. Si  $N_d$  est la concentration des atomes donneurs, ceux-ci vont libérer une population  $n$  d'électrons libres, telle que :  $n = N_d$ .

Les concentrations en électrons libres ( $n$ ) et en trous libres ( $p$ ) sont liées par la loi d'action de masse :

$$pn = n_i^2$$



**Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires.**

## 5.2 Dopage de type P

On obtient un semi-conducteur dopé P en injectant dans le silicium des atomes de la 3<sup>o</sup> colonne comme le bore (ou l'indium) qui possède trois électrons périphériques.

Il manque un électron à l'atome trivalent de bore pour réaliser les liaisons covalentes avec les quatre atomes de silicium qui l'entourent. En fait, les électrons participant aux liaisons sont indiscernables les uns des autres. Tout se passe alors comme si un des atomes de silicium voisins avait cédé un électron à l'atome trivalent de bore, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium.

L'atome de bore qui capte un électron d'un atome de silicium voisin est appelé atome accepteur, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes accepteurs sont ionisés. Si  $N_a$  est la concentration par cm<sup>3</sup> des atomes accepteurs, ceux-ci vont libérer une population  $p$  de trous libres égale à la concentration  $N_a$  [3].

La population correspondante des électrons libres ( $n$ ) est gérée à nouveau par la loi d'action de masse :

$$pn = n_i^2$$

**Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires.**

## La Jonction PN

### 1- Principe de fonctionnement

Une jonction est constituée par la réunion de deux morceaux de semi-conducteurs dopés P et N, figure 01 (jonction P-N).

Dans la zone P les **porteurs majoritaires** sont les **trous**. Les atomes **accepteurs** constituent un réseau d'ions négatifs.

De même dans la zone N les **porteurs majoritaires** sont les **électrons**. Les atomes **donneurs** constituent un réseau d'ions positifs.

**Au voisinage de la jonction**, les trous de la zone P vont neutraliser les électrons libres de la zone N (il y a diffusion des charges). Ce phénomène va s'arrêter quand le champ électrique  $E_{int}$  créé par les atomes donneurs ou accepteurs (qui vont devenir respectivement des charges + et -) va être suffisant pour contrarier le mouvement des charges mobiles. Ceci constitue une **barrière de potentiel** pour les porteurs majoritaires. Par contre, cette barrière de potentiel va favoriser le passage des porteurs minoritaires (conduction électrique).

Les deux courants antagonistes (diffusion des majoritaires et conduction des minoritaires) s'équilibrent et leur somme est nulle en régime permanent et en l'absence de champ électrique extérieur [2,4].

### 2- Jonction P-N polarisée en inverse

Si on applique un champ externe à l'aide d'un générateur en branchant le pôle + sur la zone N et le pôle - sur la zone P (figure 02), le champ électrique externe créé par le générateur de f.e.m.  $V_{inv}$  s'ajoute au champ interne de la jonction : la hauteur de la barrière de potentiel augmente.

Seul un courant de minoritaires est possible à travers la jonction. C'est le courant inverse ou courant de fuite.

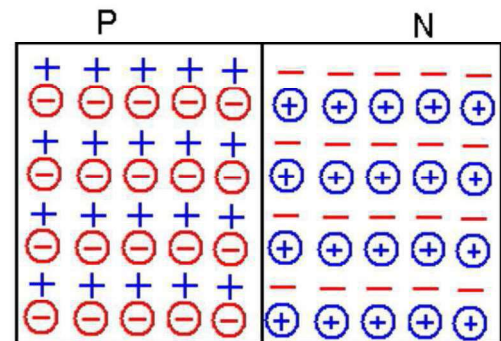


Fig. 01

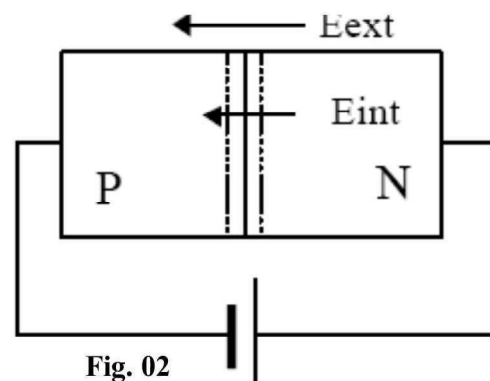


Fig. 02

### 3- Jonction P-N polarisée en direct

Dans cette situation, le pôle + sur la zone P et le pôle - sur la zone N (figure 03). Le champ externe créé par le générateur s'oppose au champ interne. Dès que le champ externe dépasse le champ interne, un courant des majoritaires s'établit à travers la jonction. Il existe pour une jonction P-N une tension de seuil qui est caractéristique du matériau : **Si** :  $V_s \gg 0,55 \text{ V}$  ; **Ge** :  $V_s \gg 0,15 \text{ V}$  [2].

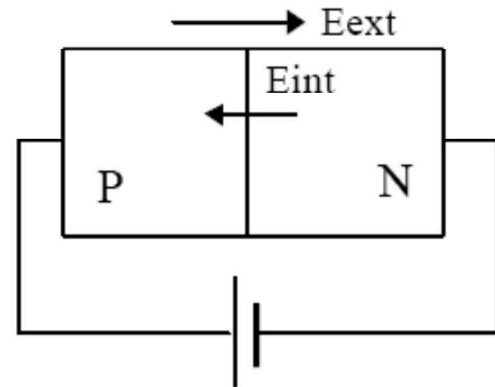


Fig. 03

### 4- Caractéristiques courant-tension

La caractéristique de la diode est liée au courant de saturation au-delà d'une tension de rupture  $U_r$  et présente un seuil  $V_s$  à partir duquel le courant augmente rapidement. Pour  $-U_r < U < V_s$ , le courant est faible et s'approche de  $I_s$ . Pour  $U < -U_r$ , il y a rupture de la caractéristique due à un effet d'avalanche. Cet effet est irréversible pour une diode normale ; une tension inverse supérieure à  $U_r$  conduit donc à la détérioration de la diode.

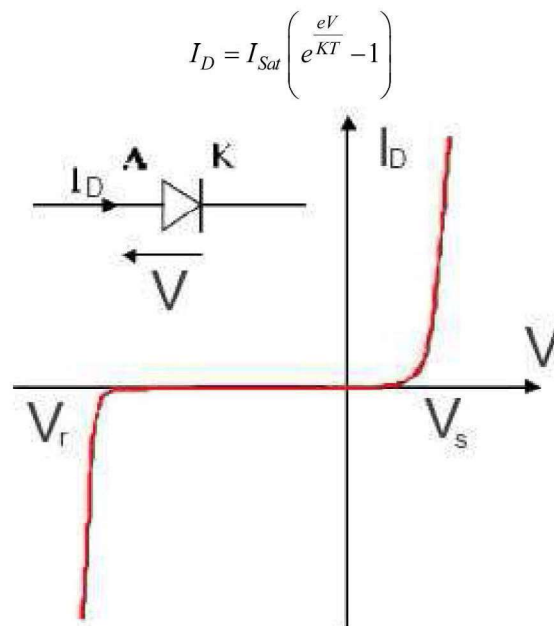


Fig. 04

## La Diode

### 1- Présentation

La diode est un dipôle à semi-conducteur (jonction PN). Les 2 bornes sont repérées **anode** « A » et **cathode** « K » [5-6].



### 2- Symbolisation



Fig. 01

### 3- Fonctionnement

La diode est un composant dit de commutation qui possède 2 régimes de fonctionnement :

- Diode à l'état : **Passant**.
- Diode à l'état : **Bloqué**.

La diode peut ainsi commuter de l'état passant à l'état bloquée.

### 4- Caractéristiques courant-tension

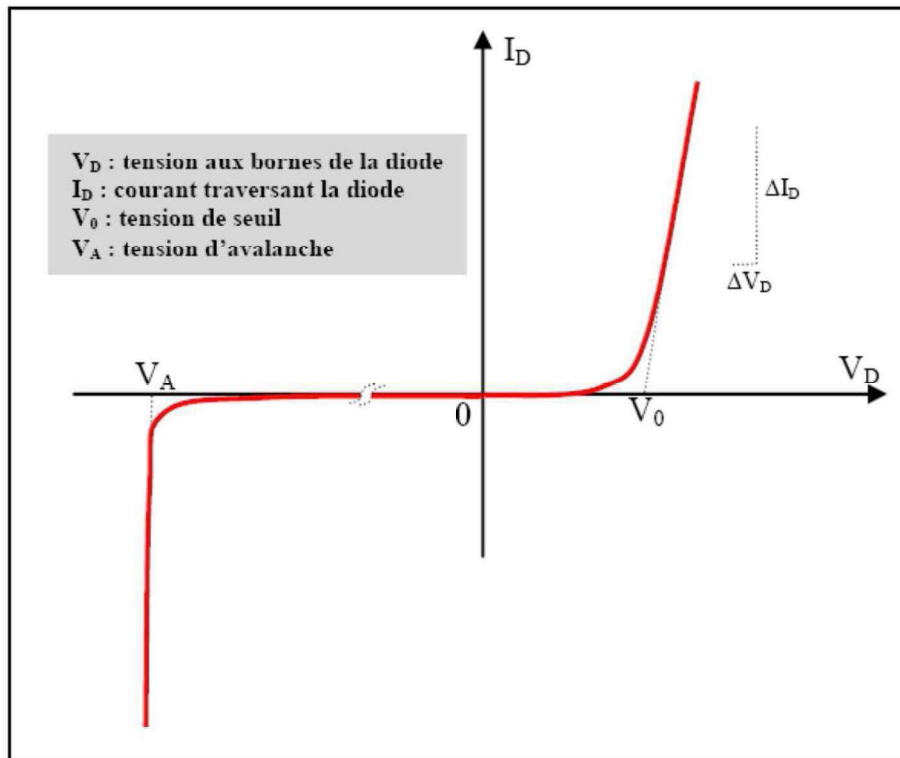
En dessous du seuil  $V_S$  le courant est très faible. Au-delà, le courant de la diode est lié au courant de saturation par la relation suivante [5-6] :

$$I_D = I_{Sat} \left( e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

Où :

- $I_S$  est le courant de saturation.
- $e$  la charge de l'électron =  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$  ;
- $k$  constante de Boltzman =  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ;
- $T$  température absolue (en degré Kelvin).

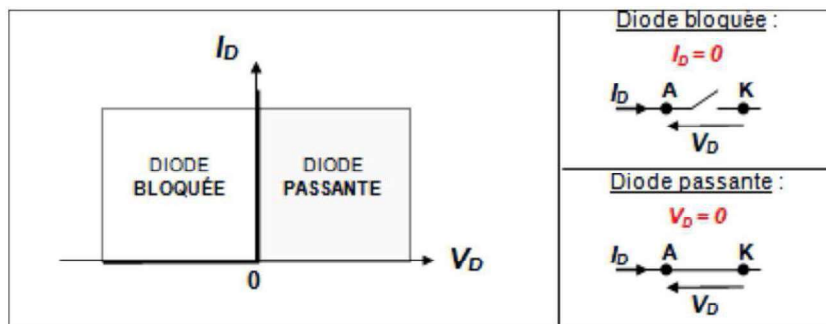
La caractéristique est représentée à la figure ci-dessous :



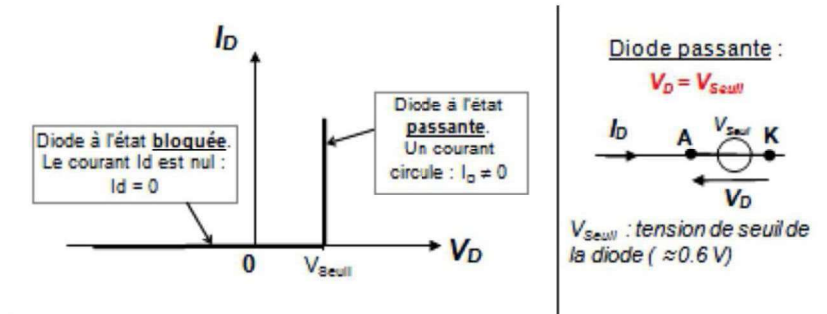
- **Caractéristique directe ( $V_D > 0$ )** : La diode est passante, c'est une zone linéaire.
- **Caractéristique inverse ( $V_D < 0$ )** : la diode est polarisée en inverse, c'est la zone de blocage inverse.

5- Schéma équivalent (Modèles électriques)

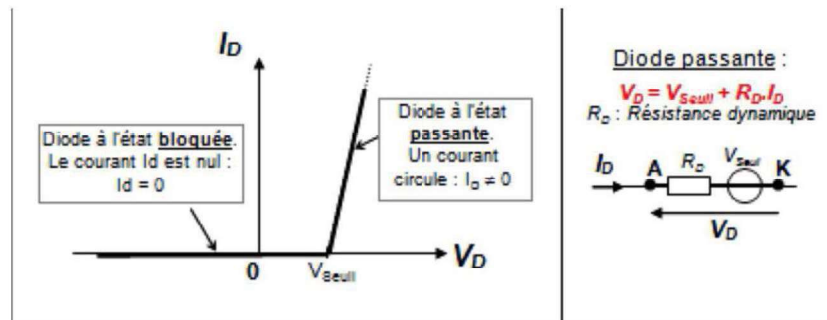
a- Modélisation n°1 : la diode « idéale »



**b- Modélisation n°2 : diode avec seuil**

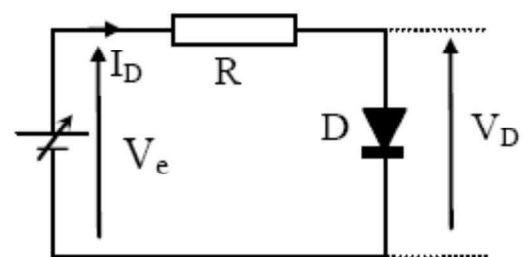


**c- Modélisation n°3 : diode avec seuil et résistance**

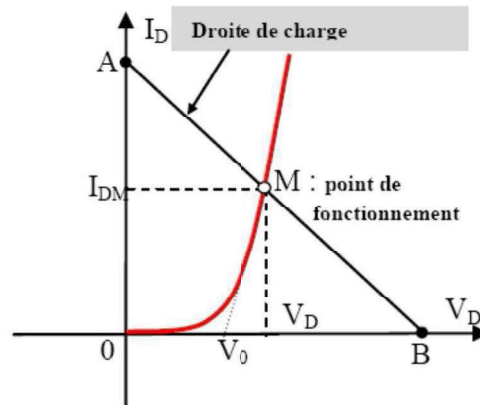


**6- Droite de charge et point de fonctionnement**

Dans un circuit électronique, il est important d'avoir une connaissance sur la tension  $V_D$  appliquée à la diode et également le courant qui la traverse lorsque la diode est polarisée dans le sens direct. Pour cela, on fait appel à l'équation de la droite de charge qu'on obtient à partir du circuit de la figure suivante [6]. :







L'équation de la droite de charge

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

Pour  $I_D = 0$ ,  $V_e = V_D$  (Point B)

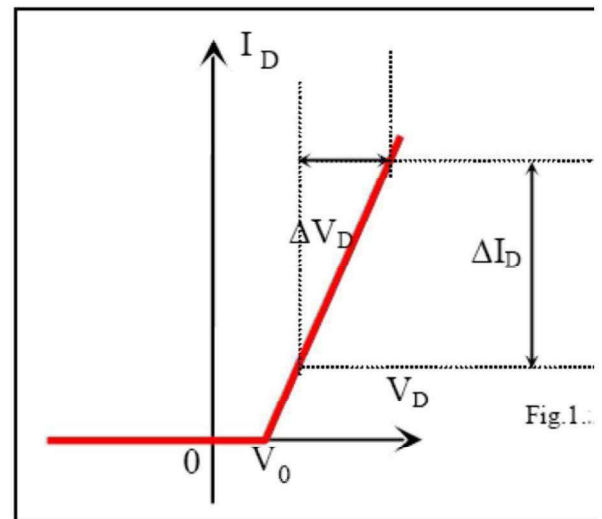
Pour  $V_D = 0$ ,  $I_D = V_e / R$  (Point A)

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).

### 7- Résistance dynamique

La résistance dynamique étant l'inverse de la pente en un point de fonctionnement de la caractéristique. C'est la résistance dynamique au point de fonctionnement ( $V_d, I_d$ ).

On peut la déduire par dérivation de la formule du courant de la diode  $I_D$ .



$$I_D = I_S [\exp(\frac{eV}{kT}) - 1]; \frac{1}{r_D} = \frac{dI_D}{dV} = \frac{e}{kT} I_S \exp(\frac{eV}{kT})$$

Donc

$$r_D = \frac{kT}{e} \frac{1}{I_S} \exp(-\frac{eV}{kT})$$

La figure ci-dessus donne la valeur de  $r_d$  en fonction de la tension de la diode : les variations sont très importantes :

$$r_D = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

## Applications des diodes

### 1- Introduction

Une des principales applications de la diode est le redressement de la tension alternative du secteur pour faire des générateurs de tension continue destinés à alimenter les montages électroniques [7].

Diagramme bloc de la figure 01 montre le schéma d'un circuit d'alimentation DC. 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.

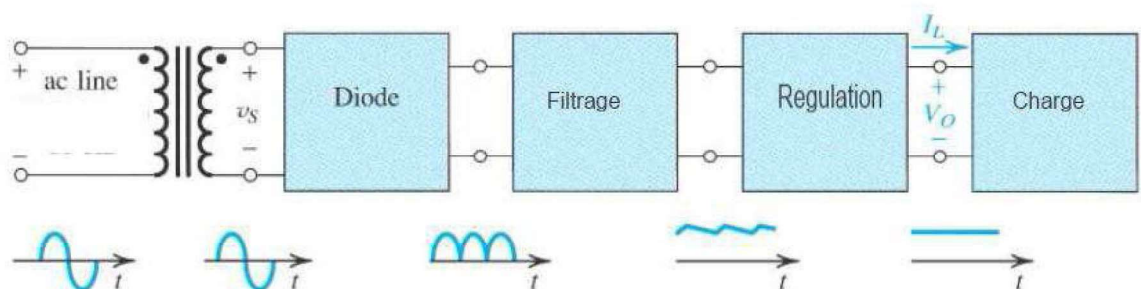


Fig. 01 : Diagramme de bloc d'un circuit d'alimentation

### 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 (figure 02).

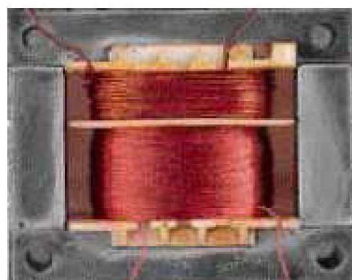


Fig. 02 : Schéma d'un transformateur

### 3- Redressement

#### 3.1 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 03 .dans lequel la tension  $e(t)$  varie sous la forme :

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

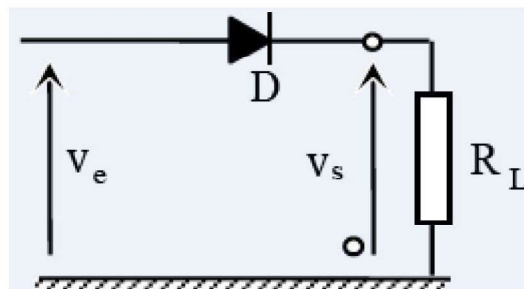


Fig. 03 : Montage simple alternance

- 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 04. Dans ces conditions la tension de sortie est identique à la tension appliquée à l'entrée :  $v_s = v_e$
- 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 05. On constate que la résistance de charge  $R_L$  n'est parcourue par aucun courant :  $v_s = 0V$ .

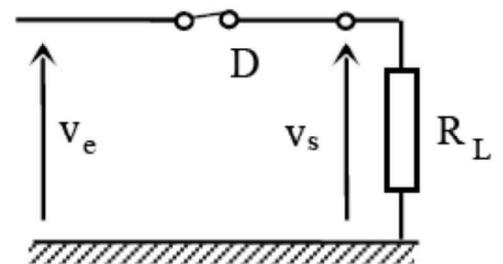


Fig. 04

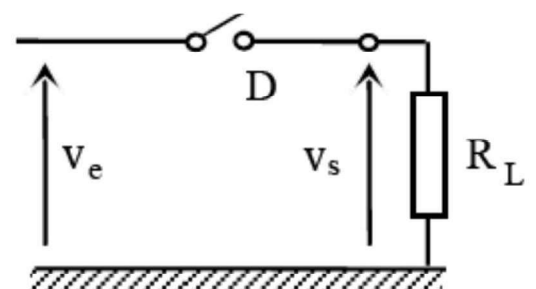
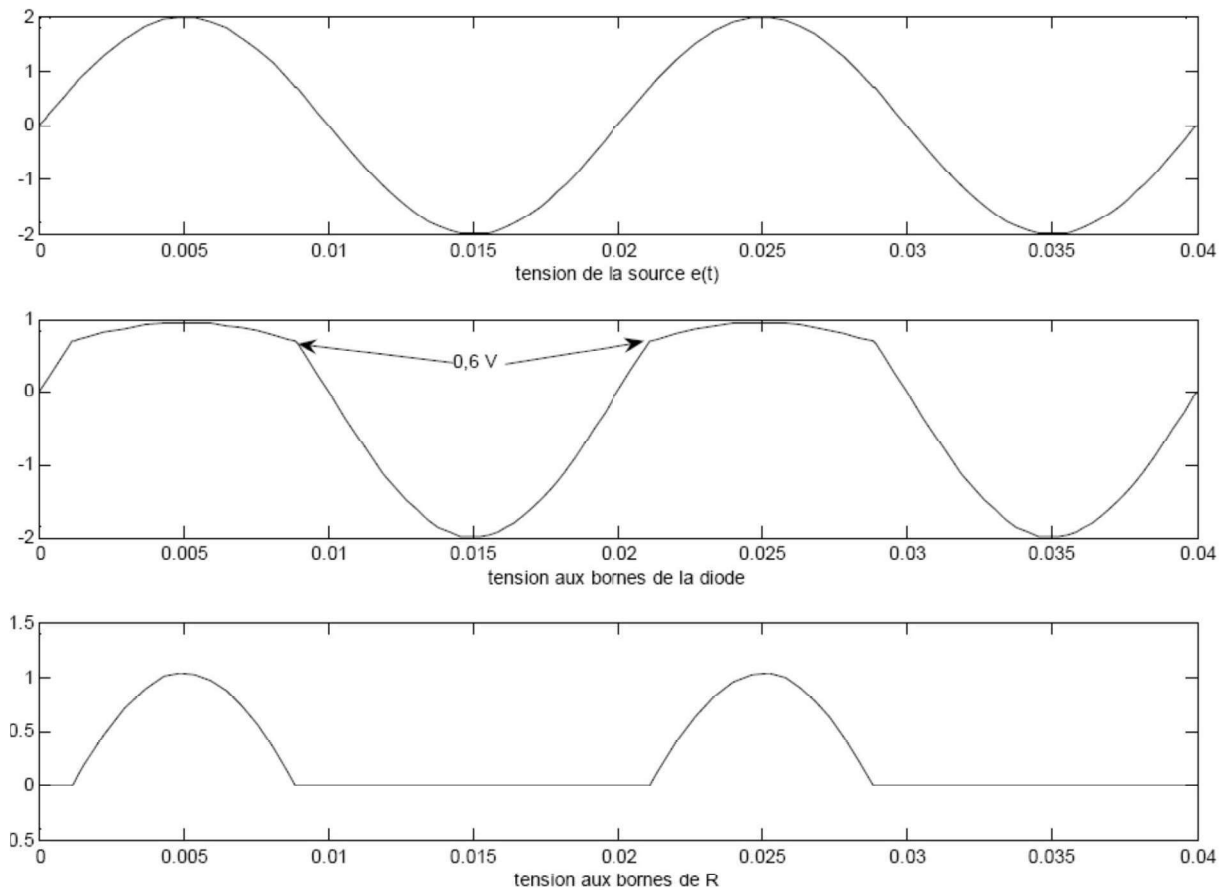


Fig. 05

La figure 06 donne l'allure des différentes tensions du montage.



**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 :

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

## 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 :  $v_1(t) = -v_2(t) = V_m \sin \omega t$ .

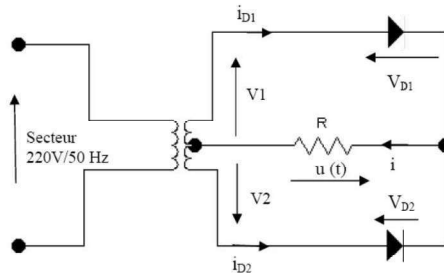


Fig. 07

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

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

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

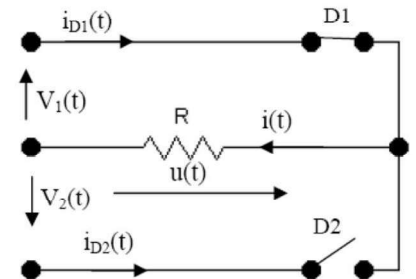


Fig. 08

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

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

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

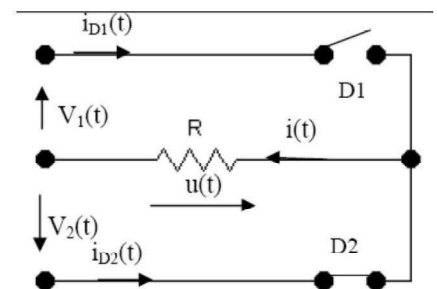


Fig. 09

### 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).

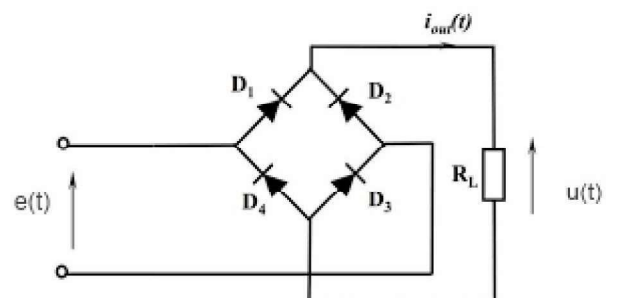


Fig. 10

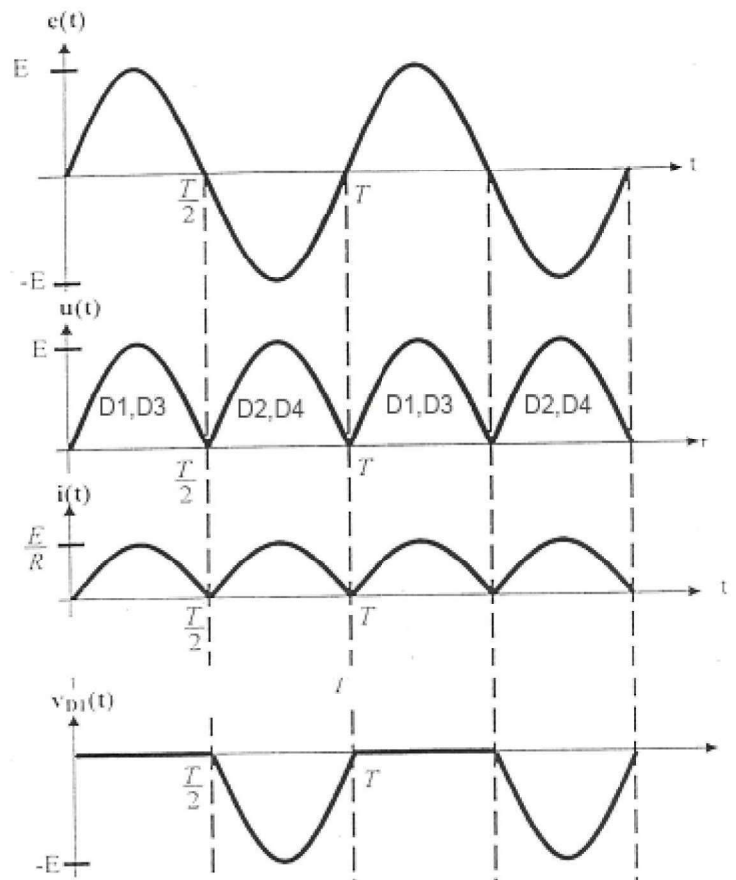


Fig. 11

## 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 :**

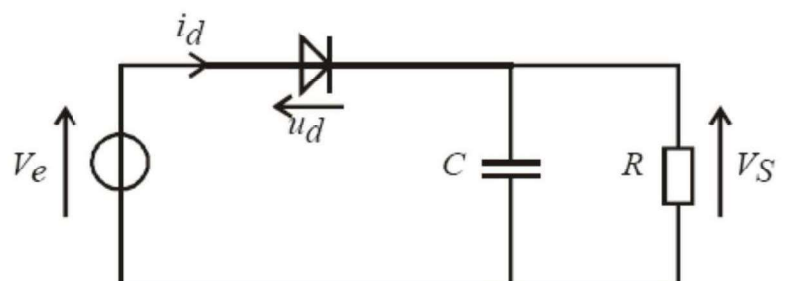
$$F = \frac{U_{eff}}{U_{moy}} = \frac{\frac{U_{max}}{\sqrt{2}}}{\frac{2 \times U_{max}}{\pi}} \Rightarrow F = \frac{\pi}{2 \times \sqrt{2}} = 1,11$$

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

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

**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).

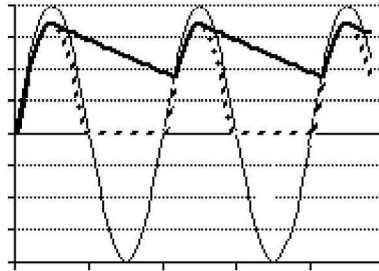


Fig. 13

### 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).

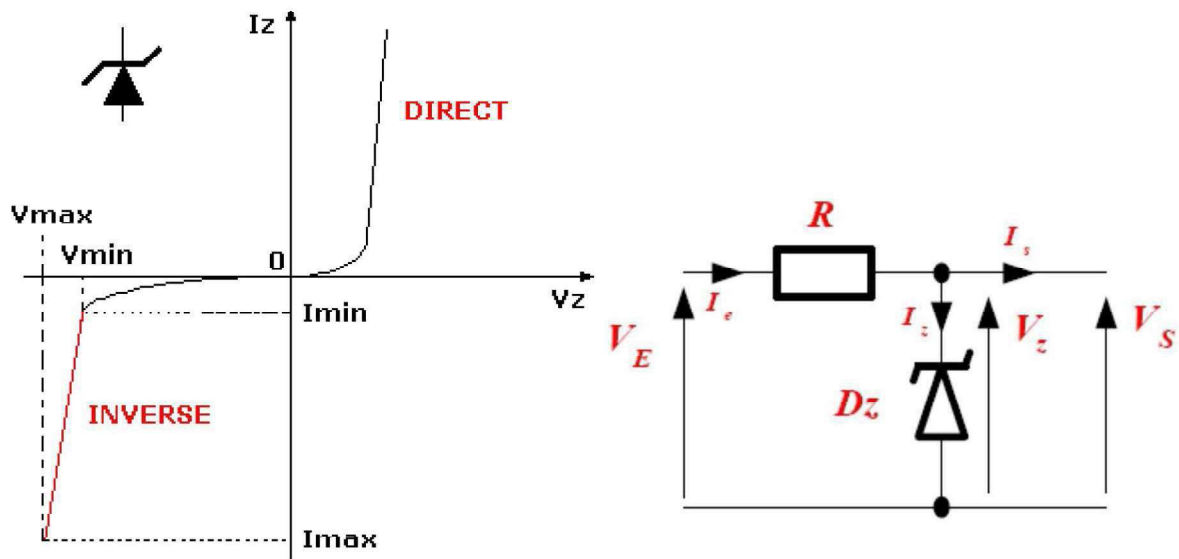
Le courant fourni par le condensateur dans sa phase de décharge est voisin de  $I_{\max}$ . La formule de C permet d'écrire :

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

## 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 :**

$$R \leq \frac{V_{Emin} - V_z}{I_{max} + I_{min}}$$

$I_{min}$  est l'intensité au-dessous de laquelle la tension n'est plus stabilisée

$I_{max}$  est l'intensité au-dessus de laquelle, la puissance  $P = V_z \cdot I_{max}$  dissipée dans la diode devient destructrice

## 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  $V_{c1}$

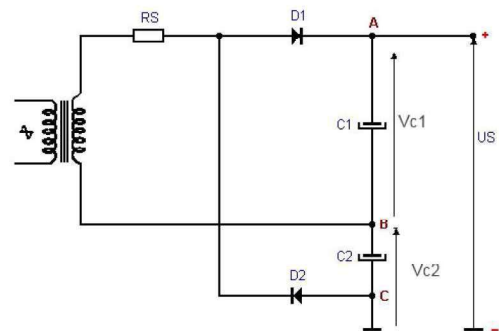
**Lors de l'alternance négative :** D1 est bloqué, alors que D2 conduit. Le condensateur électrochimique C2 se charge, le courant circulant du point B vers C2 et retournant au secondaire, par l'intermédiaire de D2 (sens conventionnel).

La tension continue de pointe entre B et C est alors  $V_{c2}$  :

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

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

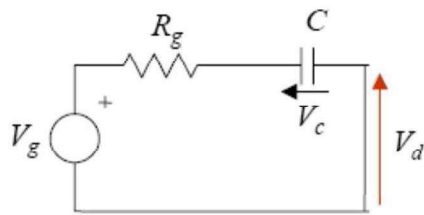
Les composants C1 et C2 se comportent donc comme deux générateurs de tension continue en série.



### 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

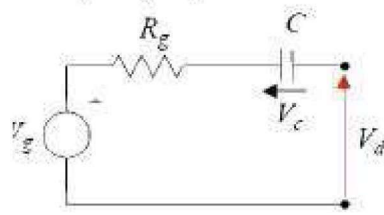
Lorsque  $V_g - V_c > 0$ , la diode est passante



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

➔  $V_d = 0$

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



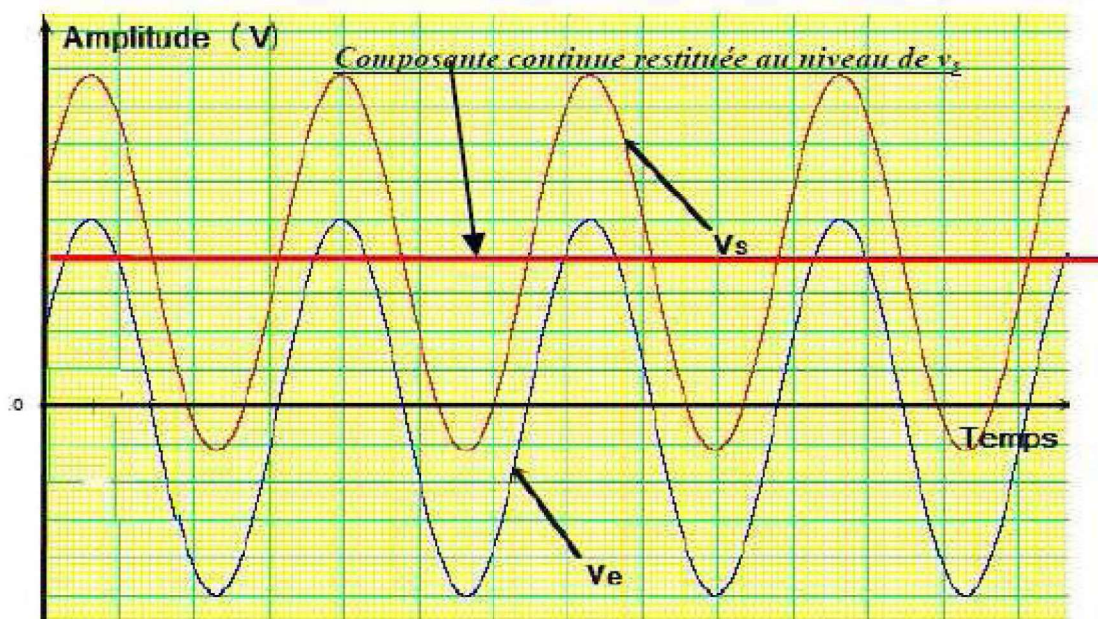
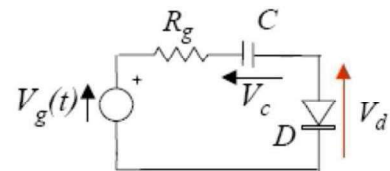
$V_c = \text{constant}$  (C ne peut se décharger)

$V_d = V_g + V_c$   
➔ - composante continue

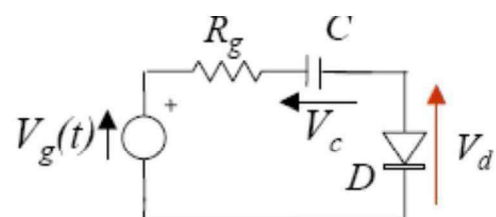
Cas particulier :

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

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

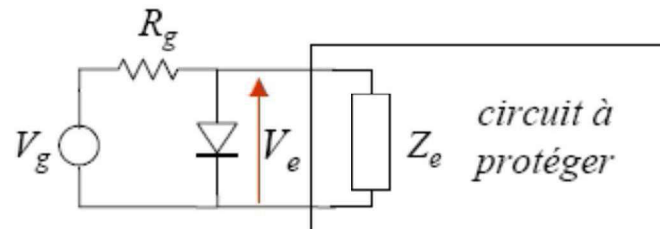


$$\begin{aligned} C &= 1\mu F \\ R_g &= 1k\Omega \\ f &= 100\text{hz} \\ V_m &= 5V \end{aligned}$$



### 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  $V_g(t) > V_0 = 0.7V$  :  $V_e \cong V_0$

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.

## 7- Différents types de la diode

### 7.1 Diode varicap

Cette diode présente une capacité variable en fonction de la tension inverse qui lui est appliquée.



### 7.2 Diodes électroluminescentes (LED)

L'abréviation LED (LED : Light Emitting Diode) est fréquemment employée pour parler des diodes électroluminescentes. Une diode électroluminescente peut-être schématisée à l'aide de la figure ci-contre.



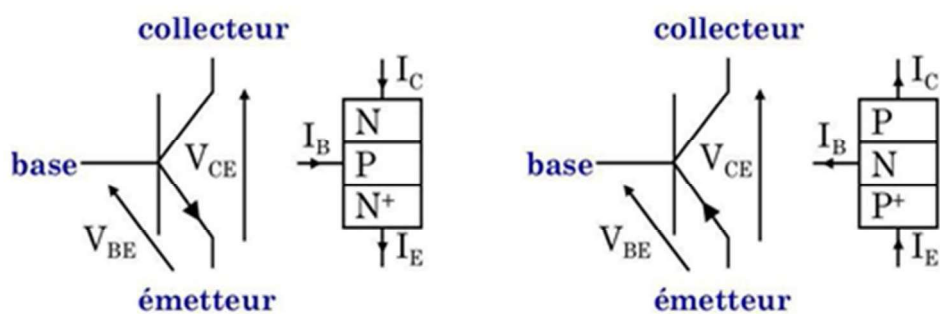
### 7.3 La diode Schottky

La diode Schottky est réalisée à partir d'une jonction métal-semiconducteur. Elle doit sa popularité à son faible seuil de tension directe et à sa rapidité de commutation. Ces particularités la destinent en priorité à la détection des signaux radiofréquence.

## Le transistor bipolaire

### 1- Introduction

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) [1,3,8].



### 2- 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  $I_B$ :  $I_C = \beta \cdot I_B$
 Cela signifie que le courant pouvant circuler dans le collecteur du transistor est proportionnel au courant circulant dans la base.

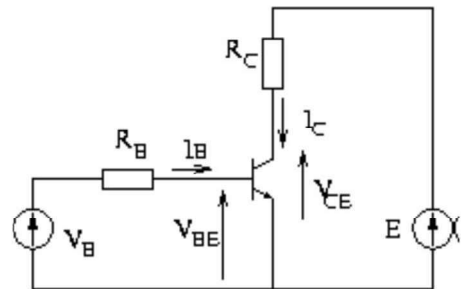
### 3- Les zones de fonctionnement du transistor

#### 3-1 Zone de blocage

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

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

On dit que le transistor est bloqué.



#### 3-2 Zone de saturation

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

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

Par ailleurs,

$$E = I_C R_C + V_{CE} \Rightarrow I_C = \frac{E - V_{CE}}{R_C} = \beta \frac{V_B}{R_B}$$

Le transistor est saturé :  $V_{CE} = V_{CE_{\text{sat}}} = 0,2 \text{ à } 0,4 \text{ V}$  et  $I_C \gg E / R_C$ .

#### 3-3 Zone de fonctionnement linéaire

Le courant  $I_C$  est proportionnel au courant  $I_B$ . On exprime ceci à l'aide de la relation suivante :

$$I_C = \beta I_B$$

où  $\beta$  est appelé gain en courant du transistor.

La tension  $V_{CE}$  est différente de 0V. Elle a une valeur comprise entre 0V et la tension d'alimentation du montage. La jonction base-émetteur est passante (ou conduit), ainsi  $V_{BE} = 0,7\text{V}$ .

## Polarisation de transistor bipolaire

### 1- Introduction

La polarisation a pour rôle de placer le point de fonctionnement du transistor dans une zone où ses caractéristiques sont linéaires. Le choix du point de repos dépend de l'application du circuit. Il doit être à l'intérieur du domaine de fonctionnement du transistor [9-10].

### 2- Montages de la polarisation

#### 2.1 Polarisation par résistance de base

Le circuit de polarisation de base est un montage « à courant  $I_B$  constant », puisque c'est bien  $I_B$  qui est fixé par les éléments du circuits ( $R_B$  et  $V_{CC}$ ).

Les courants  $I_E$  et  $I_C$  qui en résultent dépendent de la valeur du gain en courant,  $\beta$ .

$$I_B = \frac{V_{cc} - V_{BE}}{R_B} \cong \frac{V_{cc} - 0.7}{R_B}$$

$$Q: I_c = \beta I_B \quad \text{et} \quad V_{CE} = V_{cc} - R_c I_c$$

- Le point de repos dépend fortement de  $\beta$   
inconvenient majeur.
- Circuit de polarisation peu utilisé.

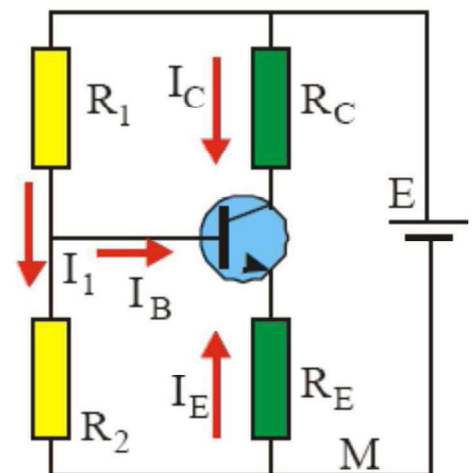
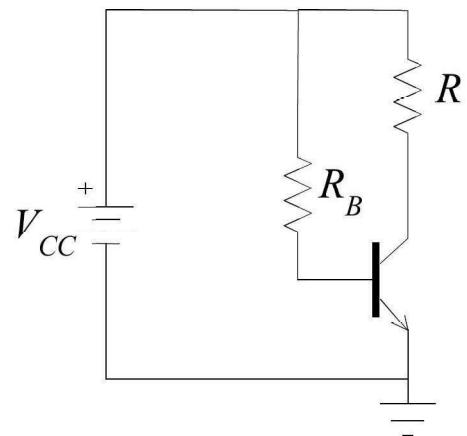
#### 2.2 Polarisation par diviseur de tension

C'est le circuit de polarisation le plus couramment utilisé. Il fixe le courant émetteur  $I_E$  et c'est  $I_B$  qui dépend de  $\beta$ .

$$V_{BM} = V_{BE} + V_{EM}$$

$$I_E = -V_{EM} / R_E = -(R_2 \cdot I_1 - 0,65) / R_E$$

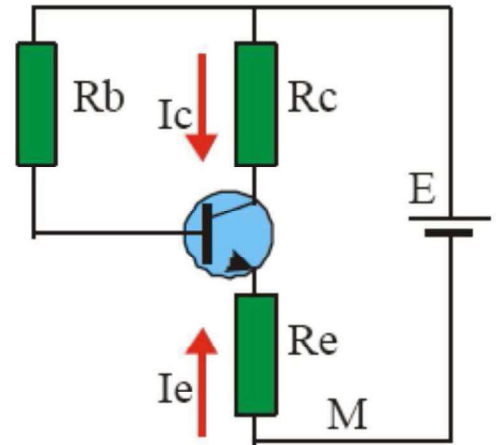
$$V_{BM} = R_2 \cdot I_1$$





### 2.3 Polarisation par réaction d'émetteur

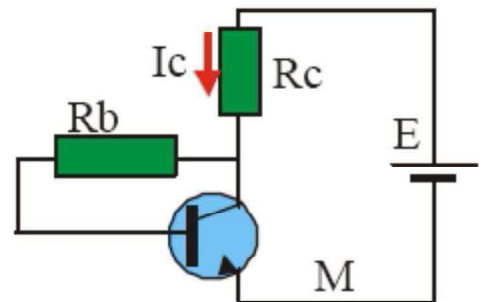
L'introduction d'une résistance entre l'émetteur et la masse est une façon de compenser les variations de  $\beta$ . Le potentiel d'émetteur ( $V_{EM} = R_E \cdot I_C$ ) croît ainsi que le potentiel de base ( $V_{BE} \gg 0,65 \text{ V}$ ) ce qui diminue ainsi le courant base puisque  $I_B = (E - V_{BM})/R_B$ .



### 2.4 Polarisation par réaction de collecteur

La propriété intéressante de ce montage est d'assurer que le transistor ne soit jamais en mode saturé. En effet, la tension  $V_{CE}$  ne peut être inférieure à  $V_{BE}$ , qui elle est de l'ordre de 0.7 V.

$$I_C \approx \frac{V_{CC} - 0.7}{R_C + \frac{R_B}{\beta}}$$



### 3- Exemple

Soit le montage de la figure 1 :

#### Partie I :

On donne :  $R_C = 4.7 \text{ K}\Omega$ ,  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ,  $V_{CE} = 4.8 \text{ V}$ ,  $\beta = 60$ ,

$$E = 12 \text{ V}, I_C = 1 \text{ mA}, I_2 = 0.18 \text{ mA}$$

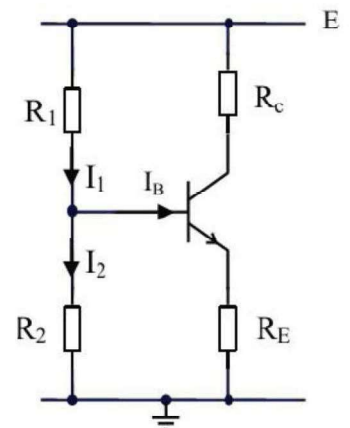
1. Calculer les résistances  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_E$

#### Partie II :

On donne :  $R_C = 10 \text{ K}\Omega$ ,  $R_E = 1 \text{ K}\Omega$ ,  $R_1 = 10 \text{ K}\Omega$ ,  $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$

$V_{BE} = 0.7 \text{ V}$ ,  $\beta = 100$ ,  $E = 15 \text{ V}$

1. Déterminer le circuit équivalent de Thévenin ( $V_{th}$ ,  $R_{th}$ ) vu de la base du transistor
2. Calculer le courant  $I_E$



### 1. Calcul de résistances de montage :

- $E = R_C I_C + V_{CE} + R_E I_E \Rightarrow E - V_{CE} = R_C I_C + R_E I_E$  (1)

Avec  $I_E = I_C + I_B$  et  $I_B = \frac{I_C}{\beta} \Rightarrow I_E = I_C(1 + \frac{1}{\beta})$ ,  $\beta \gg 1$  donc  $I_E \approx I_C$

$$(1) \Leftrightarrow E - V_{CE} = (R_C + R_E)I_C \Rightarrow R_E = \frac{E - V_{CE}}{I_C} - R_C = \frac{12 - 4.8}{10^{-3}} - 4.7 = 2.5 \text{ K}\Omega$$

- $V_{R2} = V_{BE} + V_{RE}$

$$R_2 I_2 = V_{BE} + R_E I_E = 0.7 + 2.5 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3} = 3.2 \text{ V}$$

$$R_2 = \frac{3.2}{0.18 \cdot 10^{-3}} = 17.8 \text{ K}\Omega$$

- $E = (R_1 + R_2)I_2 + R_1 I_B$  et  $I_1 = I_2 + I_B$   $R_1 = \frac{(E - R_2 I_2)}{I_1}$

$$I_1 = I_2 + \frac{I_C}{\beta} = 0.18 + 0.017 = 0.197 \text{ mA}$$

$$\text{donc : } R_1 = \frac{(12 - 3.2)}{0.197} = 44.6 \text{ K}\Omega$$

## Transistor Bipolaire en Régime Variable

### 1- Paramètres hybrides

Le transistor est considéré comme un quadripôle ; il a deux bornes d'entrée et deux bornes de sortie: courant et tension d'entrée ( $I_B$  et  $V_{BE}$ ) courant et tension de sortie ( $I_C$  et  $V_{CE}$ ).

Les paramètres petits signaux en émetteur commun sont donnés par :

$$v_{BE} = h_{11e} \cdot i_B + h_{12e} \cdot v_{CE}$$

$$i_C = h_{21e} \cdot i_B + h_{22e} \cdot v_{CE}$$

$$h_{11e} = \left( \frac{v_{BE}}{i_B} \right)_{v_{CE}=0} \quad \text{C'est l'impédance d'entrée si la variation de tension de sortie est maintenue nulle.}$$

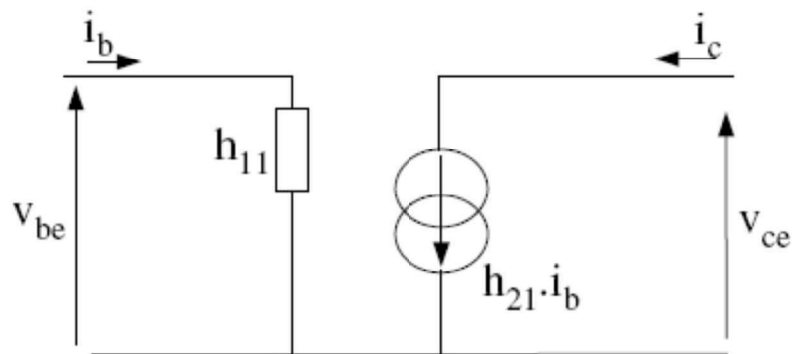
$$h_{21e} = \left( \frac{i_C}{i_B} \right)_{v_{CE}=0} \quad \text{C'est le gain en courant si la variation de tension de sortie est maintenue nulle.}$$

$$h_{22e} = \left( \frac{i_C}{v_{CE}} \right)_{i_B=0} \quad \text{C'est la pente des caractéristiques ( $h_{22e}$  serait nul si les caractéristiques étaient horizontales).}$$

$$h_{12e} = \left( \frac{v_{BE}}{v_{CE}} \right)_{i_B=0} \quad \text{C'est le rapport des variations des tensions d'entrée et de sortie.}$$

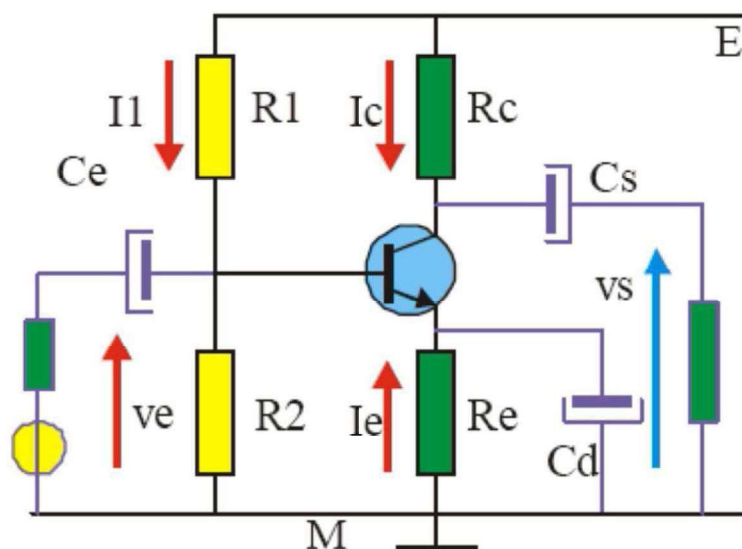
## 2- Schéma équivalent

Le schéma électrique équivalent du transistor est celui représenté ci-dessous :



## 3- Exemple du transistor en régime variable

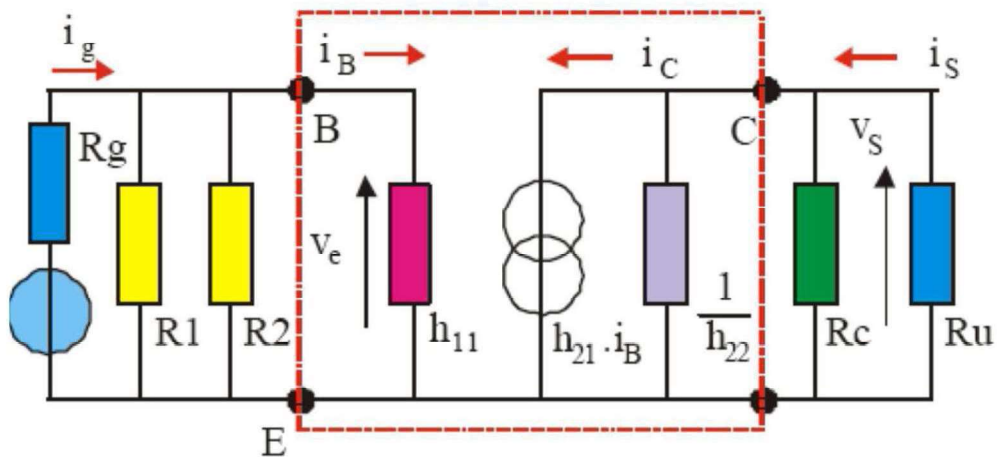
Le schéma ci-dessous est la représentation d'un montage émetteur commun du transistor bipolaire :



Dans ce montage les condensateurs  $C_E$  et  $C_S$  sont des condensateurs de liaison. Leur rôle est de permettre le passage des signaux d'entrée et de sortie sans que les potentiels continus présents sur la base et le collecteur du transistor influent sur le fonctionnement du générateur et de l'étage suivant. Leur impédance infinie en continu doit être très faible en régime.


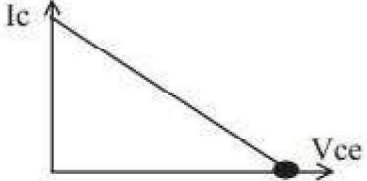

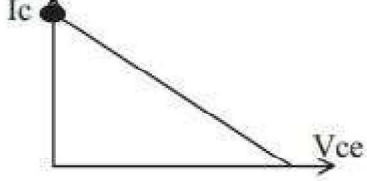
La résistance d'émetteur  $R_E$  est nécessaire pour polariser correctement le transistor, mais sa présence diminue beaucoup le gain en régime variable. On place, en parallèle à cette résistance, un condensateur de forte valeur  $C_D$  (un condensateur de découplage.) qui se comporte comme un court-circuit en alternatif et comme une impédance infinie en continu.

Le schema simplifié en régime variable est :



#### 4- Transistor bipolaire en commutation

Un transistor est utilisé en commutation lorsque son mode de fonctionnement s'apparente à un interrupteur.

Interrupteur	Transistor	Point de fonctionnement
 OUVERT	BLOQUE $I_c=0 ; V_{ce} = V_{cc}$	
 FERME	SATURE $V_{ce}=0 ; I_c=V_{cc}/R$	

## Le transistor à effet de champ

### 1. Structure

Contrairement aux transistors bipolaires dont le fonctionnement repose sur deux types de porteurs les trous et les électrons, les transistors unipolaires fonctionnent avec un seul type de charges, les trous ou les électrons. Le transistor à effet de champ à jonction est un premier exemple de transistor unipolaire [11].

Le transistor à effet de champ est un dispositif qui possède trois bornes de connexion selon une terminologie qui lui est propre. La comparaison avec le transistor bipolaire est donnée ci-dessous :

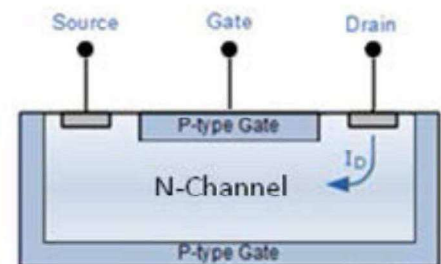
<b>Emetteur (E)</b>	<b>Source – (S)</b>
<b>Base (B)</b>	<b>Grille –(G)</b>
<b>Collecteur (C)</b>	<b>Drain - (D)</b>

Le transistor à effet de champ comporte deux types de constructions différentes, les transistors à effet de champ à canal n (EN : N-channel FET) et ceux à canal p (EN : P-channel FET).

Le JFET à canal N est dopé avec des donneurs et la conduction est dominée par le flux de porteurs majoritaires, soit des électrons. De la même manière, le canal P est dopé avec des accepteurs et la conduction se fait par les trous.

Il y a également un troisième contact, qui est appelé la grille (EN: gate). Celui-ci est constitué d'un matériau de type P (resp. de type N dans le cas d'un JFET à canal P) formant ainsi une jonction PN avec le canal.

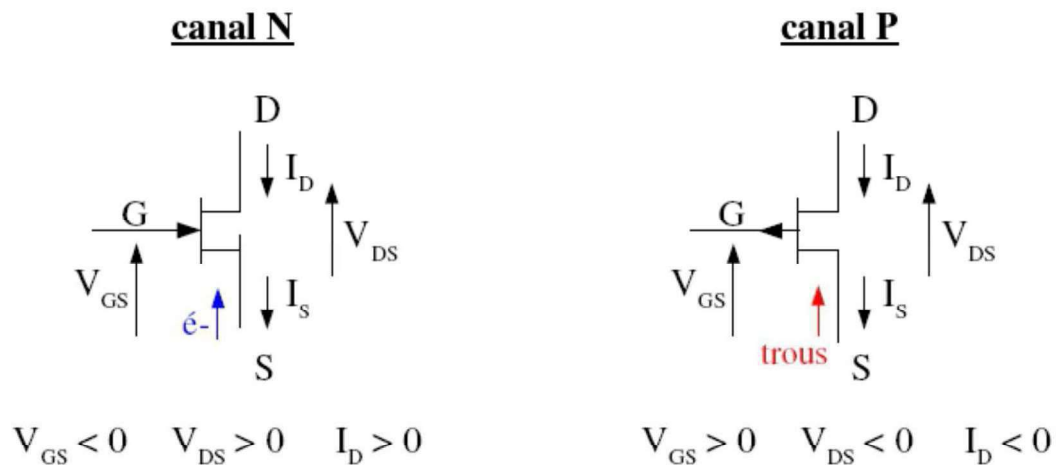
Les symboles ainsi qu'une représentation schématique des transistors JFET à canal N et P sont donnés ci-dessous.



### 2. Symboles, tensions et courants

L'atome est constitué d'un noyau autour duquel gravitent des électrons de charge électrique  $q$  négative ( $-1.6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb). Le noyau contient deux types de particules:

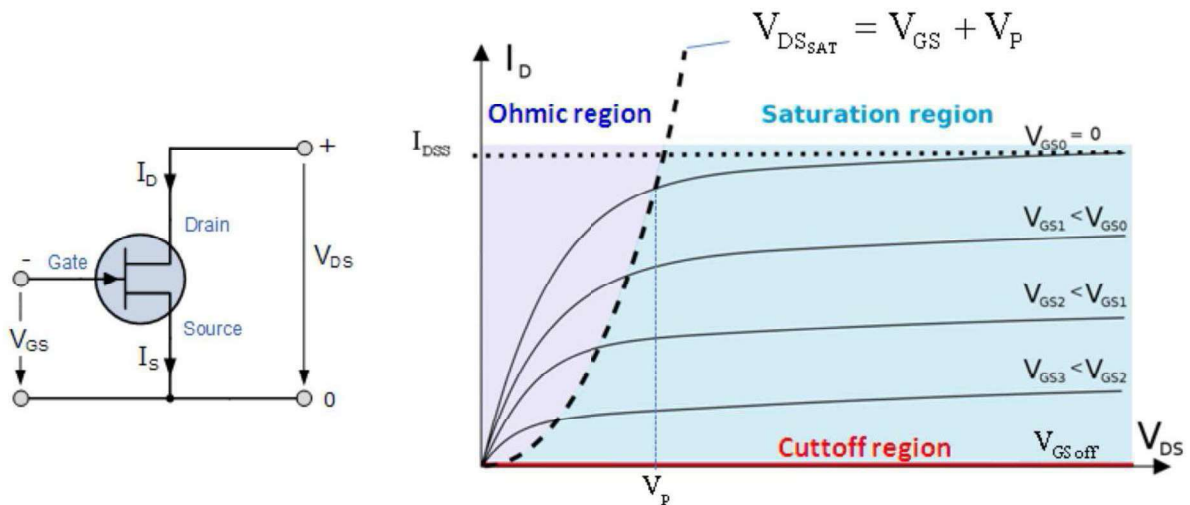
- SOURCE : électrode par laquelle les porteurs entrent dans le canal.
- DRAIN : électrode par laquelle les porteurs quittent dans le canal.
- GRILLE: électrode de commande ( $I_G = 0$ ) [12].



### 3. Fonctionnement

La Figure ci-dessous définit les quatre zones de travail d'un JFET :

- La zone ohmique (EN: Ohmic region): Lorsque  $V_{DS}$  est très petite, le JFET fonctionne comme une résistance contrôlée.
- La zone de blocage (EN: Cutoff region): Lorsque la tension  $V_{GS}$  est suffisamment négative, le canal est fermé et le courant  $I_D=0$ . Le JFET est alors similaire à un circuit ouvert.
- La zone active ou de saturation (EN: active or saturation region): Le JFET agit comme une source de courant contrôlée par la tension de gate. La tension drain-source  $V_{DS}$  a peu ou pas d'effet dans cette zone.
- La zone de claquage (EN: breakdown region): La tension  $V_{DS}$  entre le drain et la source est suffisamment haute pour créer un claquage du canal résistif. Le courant  $I_D$  augmente alors de manière incontrôlée.



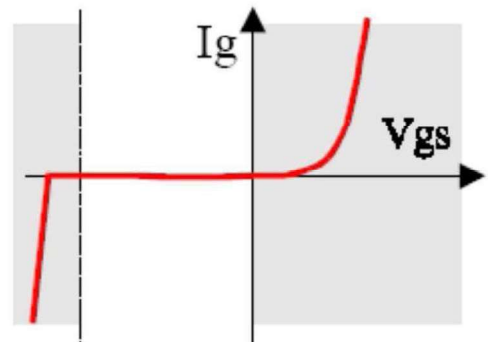
**4. Réseaux de caractéristiques**

**4.1 Réseau d'entrée**

Les transistors JFET doivent uniquement être utilisés avec des tensions  $V_{GS}$  négatives et inférieures à la tension de claquage inverse.

La caractéristique d'entrée est celle d'une diode polarisée en inverse. On a donc toujours :

$$I_G = 0$$



**4.2 Réseau de sortie**

C'est le réseau des courbes  $I_D = f(V_{DS})$  avec  $V_{GS} = \text{Constante}$ . Ce réseau est caractérisé par trois régions utiles :

- la région ohmique,
- la zone de coude,
- la zone de saturation.

Dans cette zone, on note une légère croissance de  $I_D$  avec  $V_{DS}$  car la longueur effective du canal diminue.

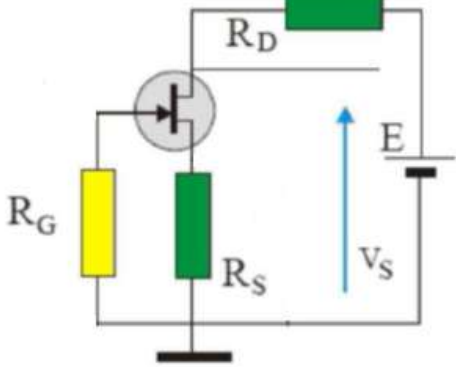
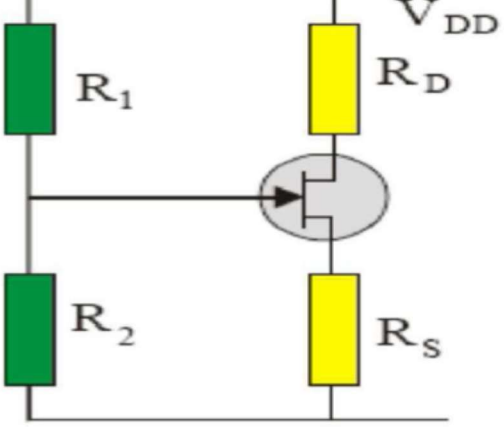


**4.3 Réseau de transfert**

Ce réseau correspond aux courbes  $I_D = f(V_{GS})$  pour  $V_{DS} = \text{Constante}$ . Les caractéristiques sont des droites pour la partie ohmique. Dans la zone de saturation pour les valeurs supérieures de  $V_{DS}$ , la caractéristique est parabolique et on peut écrire en première approximation que :

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

**5. Polarisation des transistors à effet de champ**

Polarisation automatique	Polarisation par pont diviseur
 <p>La grille est reliée à la masse par une résistance <math>R_G</math> de forte valeur. Comme le courant grille est nul, le potentiel de grille est nul. Le courant drain produit dans la résistance de source une chute de tension égale à <math>R_S \cdot I_D</math>. La tension grille-source vaut donc :</p> $V_{GS} = V_{GM} - V_{SM} = -R_S \cdot I_D$ <p>La grille est bien négative par rapport à la source. L'équation de la droite d'attaque est :</p> $V_{GS} = -R_S \cdot I_D$ <p>et celle de la droite de charge est :</p> $V_{DS} = E - (R_S + R_D) \cdot I_D$	 <p>Le potentiel appliqué à la grille est :</p> $V_{GM} = R_2 / (R_1 + R_2) \cdot V_{DD}$ <p>Le potentiel de la source est</p> $V_{SM} = R_S \cdot I_D$ <p>Comme</p> $V_{SM} = V_{GM} - V_{GS}$ <p>la valeur du courant drain est donc :</p> $I_D = (V_{GM} - V_{GS}) / R_S$ <p>Si l'on prend <math>V_{GM}</math> beaucoup plus grand que <math>V_{GS}</math>, la stabilisation sera assurée.</p>

## Transistors Métal Oxyde (MOSFET)

### 1- Structure

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  $0,1 \mu\text{m}$  [11].

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.

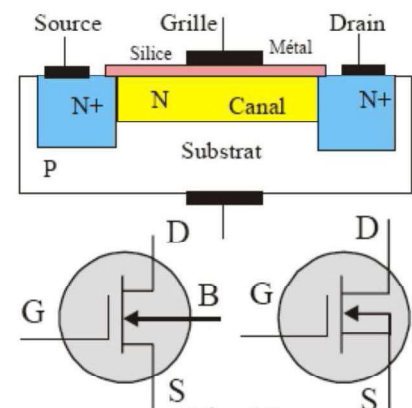
Pour ce type de transistors le courant d'entrée est nul puisque que la grille est isolée. La résistance d'entrée est toujours supérieure à  $10^{10} \Omega$ .

### 2- MOS à canal diffusé

#### 2-1 Structure et fonctionnement

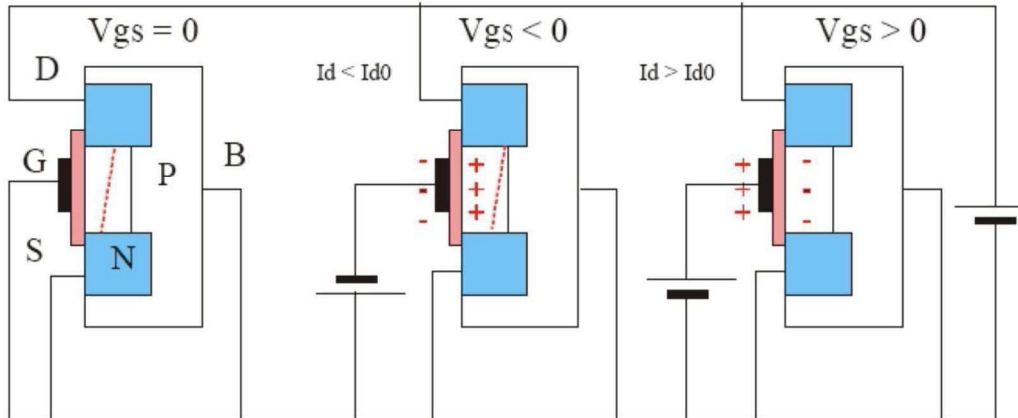
Sur un substrat (B) dopé P sont diffusées deux zones très dopées  $\text{N}^+$  formant le drain et la source reliées par un canal dopé N. Il existe également des MOS avec un canal P et qui fonctionnent avec des tensions et des courants opposés à ceux ayant un canal N.

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 [11].



Pour un potentiel  $V_{GS}$  nul et sous l'action de la tension drain-source, un courant drain  $I_D$  circule dans le canal. Sa section diminue quand on se rapproche du drain. Si  $V_{GS}$  est négatif, on induit par effet capacitif des charges positives dans le canal et donc des recombinaisons : la population en électrons diminue et la conduction du canal diminue. Le potentiel du canal est d'autant plus positif que l'on se rapproche du drain. Au contraire, si  $V_{GS}$  est positif la zone

appauvrie en porteurs régresse dans le canal et le courant drain augmente. Selon la valeur de la tension grille-source, le canal est plus ou moins conducteur.



Pour les 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 :

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

Mais cette fois VGS peut être positif ou négatif. 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.

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.

### 3- MOS à canal induit

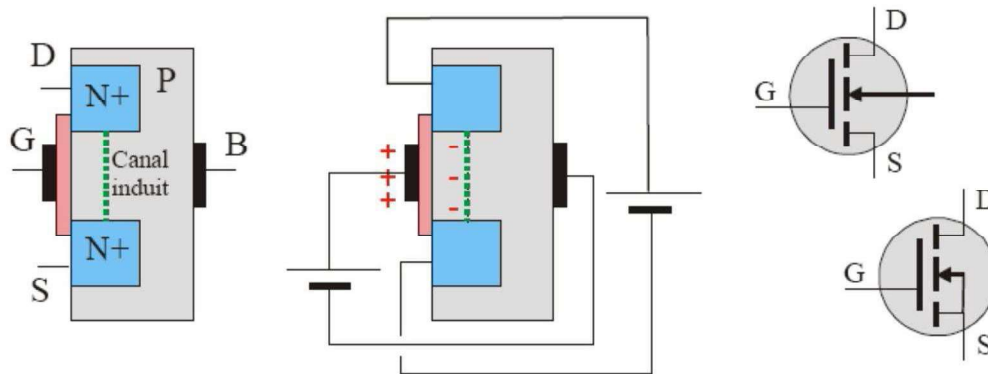
#### 3-1 Structure et fonctionnement

Pour ce type de transistor il n'y a pas de canal créé lors de la fabrication. Pour les tensions de grille VGB 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 VGB 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].

3.2 –



#### 4- 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.

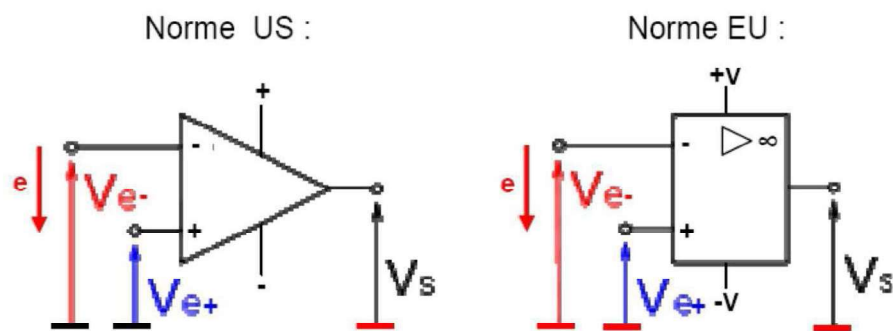
#### 5- Inconvénients des transistors MOSFET

- 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.

## L'amplificateur opérationnel

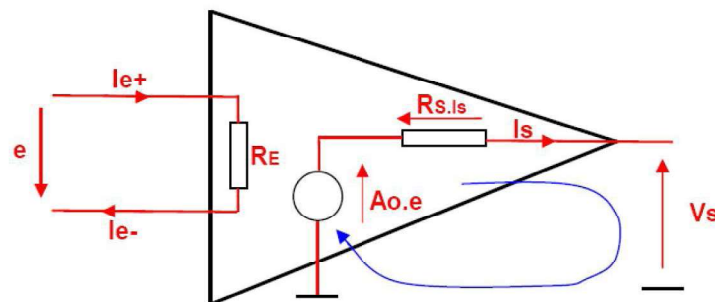
### 1- Principales caractéristiques

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



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

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  $\approx 0$  ;  $R_S \cdot I_s \approx 0$  ;  $V_s = A_o \cdot e$

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

### 2- Fonctionnement des amplificateurs opérationnels

#### 2-1 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 ( $Z_S = 0$ ).

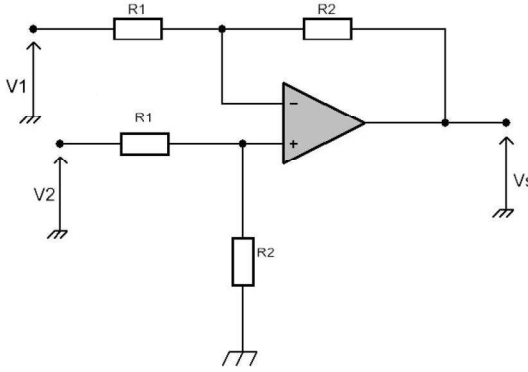
$$V^+ - V^- = e = 0$$

$$I^+ = I^- = 0$$

### 2-2 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.

### 3- applications des amplificateurs opérationnels

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

	<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> $V_e = R.I \Rightarrow I = \frac{V_e}{R}$ $V_s = -\frac{1}{C} \int i dt = -\frac{1}{RC} \int V_e dt$
	<p style="text-align: center;"><b>Derivateur</b></p> $I = C \frac{dV_e}{dt}$ $V_s = -R.I = -RC \frac{dV_e}{dt}$

## Références

- 1) A.P Malvino, Principes d'électronique. Edition Science, 2000.
- 2) Cours semi conducteur, ressources, [www.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/cours/semicon.pdf](http://www.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/cours/semicon.pdf)
- 3) Ph. Roux, theorie generale simplifiee des semi-conducteurs jonction pn au silicium effet transistor bipolaire, Dunod, 2002.
- 4) F. Manneville, J.Esquieu, Electronique- cours et exercices corrigés, Dunod, 2000.
- 5) H. CHELB, cours d'électronique, diode à jonction, ISET.
- 6) B. Haraoubia, Electronique générale, Editions, Office des Publications Universitaires (OPU), 2006, 3<sup>ème</sup> éditions.
- 7) H. CHELB, cours d'électronique, utilisation de la diode, ISET.
- 8) T. Heiser, Cours d'Electronique Analogique, [www-phase.c-strasbourg.fr/EA2004](http://www-phase.c-strasbourg.fr/EA2004).
- 9) F.Boutoille, T.Destombes, Electronique, Tome 1, Manipulations et simulations, Dunod, 2001.
- 10) Cours montage emetteur commun, [www.ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/cours/emetcom.pdf](http://www.ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/cours/emetcom.pdf)
- 11) Cours Jfet, [www.ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/cours/Jfet.pdf](http://www.ressources.univ-lemans.fr/AccessLibre/UM/Pedago/cours/Jfet.pdf)
- 12) P. Horowitz,W. Hill, Traité de l'électronique analogique et numérique Vol.1, Elektor, 1996.
- 13) L. Floyd, Electronique: composants et systèmes d'application, Dunod, 2000.
- 14) Cours sur les amplificateurs opérationnels, Sciences de l'ingénieur, B3, 1-9.