



Institut National Polytechnique

Felix Houphouët Boigny

ESI | Ecole
Supérieure
d'Industrie



Génie Électrique & Électronique

Électronique

Des

Composants

1^{ère} année STIC
Cycle ingénieur

UP Électronique
Département Génie Électrique et Électronique (GEE)

Édition 2017

Rédigée par KONE Siriky Y.



SOMMAIRE

CHAPITRE I : LES COMPOSANTS PASSIFS EN ELECTRONIQUE.....	1
I - LA RESISTANCE.....	1
II - LE CONDENSATEUR.....	4
CHAPITRE II : LA THÉORIE DES SEMI-CONDUCTEURS	6
I - GÉNÉRALITÉS.....	6
II - LES SEMI-CONDUCTEURS	7
III - JONCTION PN A L'ÉQUILIBRE.....	10
IV - JONCTION POLARISÉE	11
CHAPITRE III : LES DIODES	12
I - LA DIODE À JONCTION.....	12
II - LA DIODE ZÉNER.....	19
III - LA DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE OU LED	23
CHAPITRE IV : LE TRANSISTOR BIPOLAIRE	24
I - PRESENTATION DU TRANSISTOR BIPOLAIRE.....	24
II - CARACTERISTIQUES STATIQUES D'UN TRANSISTOR.....	25
III - POLARISATION D'UN TRANSISTOR BIPOLAIRE.....	27
IV - MÉTHODOLOGIE DE DÉTERMINATION DE L'ÉTAT D'UN TRANSISTOR.....	33
V - LE TRANSISTOR BIPOLAIRE EN REGIME DYNAMIQUE	34
CHAPITRE V : LE TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP	36
I - TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A JONCTION OU JFET	36
II - TRANSISTOR MOS OU MOSFET.....	42
CHAPITRE VI : LES CIRCUITS INTEGRES ANALOGIQUES	46
I - L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL.....	46
II - LE REGULATEUR INTEGRE DE TENSION	52
III - LE NE555.....	55

CONSIGNES ET RECOMMANDATIONS

Chaque séance de cours d'Électronique des Composants est une occasion d'explication et d'approfondissement du contenu du support de cours. Il est donc demandé à chaque étudiant de :

- ❖ Préparer chaque séance de cours ;
- ❖ Avoir une réflexion sur les exercices d'applications et les TD proposés ;
- ❖ Connaître les pré-requis pour chaque séance de cours.

PROGRESSION

La progression du cours d'Électronique des Composants est la suivante :

Séance 1	Révision : Méthodes d'analyses de réseaux électriques	3 H
Séance 2	Evaluation N° 1 - 20 min Révision 2 : Equations différentielles linéaires	3H
Séance 3	Chapitres I : Les composants passifs en électronique Chapitre II : La théorie des semi-conducteurs	3 H
Séance 4	Chapitre III : Les diodes	3 H
Séance 5	Evaluation N° 2 - 20 min Chapitres IV : Le transistor bipolaire	3 H
Séance 6	Chapitres V : Le transistor à effet de champ	3 H
Séance 7	Evaluation N° 3 - 20 min TD N° 1 : Diodes et transistors	3 H
Séance 8	Chapitres VI : Les circuits intégrés analogiques	3 H
Séance 9	Chapitres VI : Les circuits intégrés analogiques	3 H
Séance 10	Evaluation N° 4 - 20 min TD N° 2 : Circuits intégrés	3 H

CHAPITRE I : LES COMPOSANTS PASSIFS EN ELECTRONIQUE

Objectifs du cours :

- Etre capable d'identifier sur un schéma électronique et dans un circuit réel chaque composant ;
- Connaître les fonctions que peuvent réaliser chaque composant dans un montage ;
- Connaître les caractéristiques essentielles de chaque composant ;
- Etre capable d'analyser un montage comportant chaque composant.

Prérequis : La physique générale

Durée du cours : 1 Heure 30

I - LA RESISTANCE

1 - Définition

Une résistance ou un conducteur ohmique est un composant électronique dont la caractéristique principale est de s'opposer au passage du courant dans un circuit. Cette opposition s'accompagne d'une dissipation d'énergie dans le composant par effet joule.

Une résistance est également un composant passif non polarisé faisant partir des composants les plus utilisés dans le domaine électrique et électronique. Sa valeur dépend de certains paramètres de la technologie utilisée.

On a : $R (\Omega) = \rho (\Omega.m) \cdot \frac{L (m)}{S (m^2)}$ avec $\rho = \rho_0(1+\alpha T)$

R : Résistance

ρ : Résistivité

ρ_0 : Résistivité à 0°C

α : Coefficient de température en °C⁻¹

T : Température en °C.

L : Longueur du conducteur

S : Surface de la section du conducteur



Figure I.1.a : Portion de cuivre

Exemple :

Quelle est la résistance d'une portion de cuivre de longueur L = 100 m et de diamètre D = 2mm. On donne $\rho_{Cu} = 1,8 \cdot 10^{-8} \Omega.m$.

A.N. : R = 0,573 Ω .

2 - Classification et symboles

Les résistances sont le plus souvent désignées par la lettre R et peuvent être classées en deux (02) grandes familles : les résistances fixes et les résistances variables.

- Les résistances fixes :

Une résistance est dite fixe lorsqu'elle possède une valeur ohmique qui est constante entre ses bornes.

Les résistances fixes couramment utilisées en électronique se classent essentiellement en trois catégories selon la technologie de fabrication.

- Les résistances au carbone (à carbone aggloméré et à couche de carbone) ;
- Les résistances métalliques non-bobinées (à couche métallique et à couche d'oxyde métallique) ;
- Les résistances métalliques bobinées (de puissance, de précision et de haute précision).

La valeur ohmique d'une résistance fixe est donnée par le code de couleurs. Le tableau ci-après donne la valeur et la tolérance associées à chaque couleur.

Tableau I.2.a : Valeur et tolérance associées à chaque couleur

Couleur	Noir	Marron	Rouge	Orange	Jaune	Vert	Bleu	Violet	Gris	Blanc	Argent	Or
Valeur	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Tolérance	±20%	±1%	±2%								±10%	±5%

CODE A 4 COULEURS

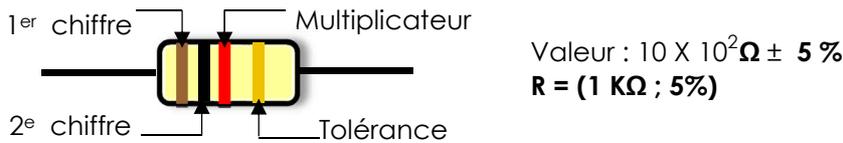


Figure I.2.a : Valeur d'une résistance par le code de couleurs

Une résistance de cette famille possède deux bornes de connexion et le symbole se présente en général comme suit :



Figure I.2.b : Symbole d'une résistance fixe



Figure I.2.c : Résistance à couche de carbone

– Les résistances variables :

Une résistance est dite variable lorsqu'elle offre la possibilité de faire varier manuellement la valeur ohmique entre ses bornes par le biais d'un curseur. On distingue 3 catégories de résistances variables :

▪ **Les potentiomètres**

Le potentiomètre est présent dans la plupart des appareils électroniques grand public pour assurer l'interface avec l'utilisateur. Il sert à contrôler certains paramètres tels que le volume et la fréquence du son dans un système audio. La valeur ohmique d'un potentiomètre appartient à une plage de valeurs modifiable par une action linéaire ou rotative sur le curseur.



Figure I.2.d : Symbole d'un potentiomètre



Figure I.2.e : Potentiomètre rotatif

▪ **Les résistances ajustables**

La résistance ajustable, aussi appelée résistance réglable, est une résistance variable dont les différentes valeurs ohmiques possibles sont prédéfinies.



Figure I.2.f : Symbole d'une résistance ajustable



Figure I.2.g : Boîte à décades

▪ **Les rhéostats**

Le rhéostat est une résistance variable utilisée en général comme une charge pour fixer l'intensité du courant.

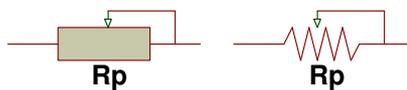


Figure I.2.h : Symbole d'un rhéostat



Figure I.2.i : Rhéostat

La valeur de ces résistances est directement inscrite sur le composant par marquage.

3 - Fonctions d'une résistance

La résistance est un composant électronique qui permet de réaliser deux grandes fonctions que sont :

❖ **La limitation du courant**

La résistance joue le rôle de limiteur de courant électrique dans la branche du circuit dans laquelle elle se trouve.

❖ **La chute de tension**

En plus d'être un élément de protection par la limitation du courant, la résistance permet aussi de provoquer une chute de tension.

4 - Caractéristiques électriques d'une résistance

Une résistance, comme tout composant électronique, possède des caractéristiques dont les plus essentielles sont la valeur ohmique et la puissance dissipée.

– **La valeur ohmique :**

C'est la valeur que peut avoir une résistance. Elle s'exprime en Ohms (Ω).

En électronique, on utilise couramment le kilo ohm ($k\Omega$) et le mégohm ($M\Omega$) qui sont des sous-multiples.

Dans la réalité, certaines valeurs ohmiques n'existent pas sur le marché et celles indiquées par les constructeurs sur chaque résistance par le code de couleurs ou par marquage sont appelées valeurs ohmiques normalisées.

Exemple : Valeurs normalisées de la série E 12, tolérance $\pm 10\%$
 10 ; 12 ; 15 ; 18 ; 22 ; 27 ; 33 ; 39 ; 47 ; 56 ; 68 ; 82

– **La puissance dissipée :**

Elle correspond à la puissance perdue par effet joule par une résistance. Cette puissance s'exprime en Watts (W). Il existe également à ce niveau des valeurs normalisées de puissance.

Exemple : Valeurs normalisées de puissance
 0,25 W ; 0,5 W ; 1 W ; 1,5 W ; 2,5 W ; 3 W ; 5 W ; 8 W ; 10 W ; 12 W ; 15 W ; 20 W ; 25 W ; ...

Si la puissance dissipée par une résistance est supérieure à la valeur maximale spécifiée par le constructeur elle peut brûler ou changer fortement de valeur sans modification de son aspect externe. Il est donc important de savoir calculer la puissance dissipée par une résistance dans un montage et de choisir par conséquent la résistance qui correspond au mieux.

5 - Groupement de résistances

Il peut être utile de recourir à un groupement de résistances pour plusieurs raisons parmi lesquelles nous pouvons citer :

- L'obtention d'une valeur de résistance qui n'existe pas dans les valeurs normalisées produites par l'industrie ;
- La compensation de dissipation de la chaleur produite par la résistance ;
- La gestion de l'encombrement.

Il existe 2 types de groupement de résistances : le regroupement série et le regroupement parallèle.

❖ **Le regroupement série**



Figure I.5.a : Résistances en série

❖ **Le regroupement parallèle**

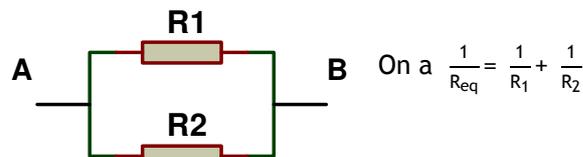


Figure I.5.b : Résistances en parallèle

II - LE CONDENSATEUR

1 - Définition

Un condensateur est un composant électronique constitué de deux plaques conductrices (armatures) séparées par un isolant appelé diélectrique.

Lorsqu'on applique une différence de potentiel entre ses armatures, une charge électrique s'accumule dans le condensateur, proportionnelle à la tension appliquée et à une grandeur caractéristique du condensateur appelée capacité.

C'est l'un des composants passifs les plus utilisés dans le domaine électronique. La valeur de sa capacité dépend de la dimension des armatures (surface), de l'épaisseur de l'isolant ainsi que d'une caractéristique de cet isolant appelée constante diélectrique. La structure d'un condensateur peut se présenter sous plusieurs formes : plan, cylindrique, sphérique, etc.

Pour un condensateur plan, on a : $C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{e}$

C : Capacité

ϵ_0 : Permittivité du vide

ϵ_r : Permittivité relative de l'isolant

S : Surface d'une armature

e : Épaisseur du diélectrique

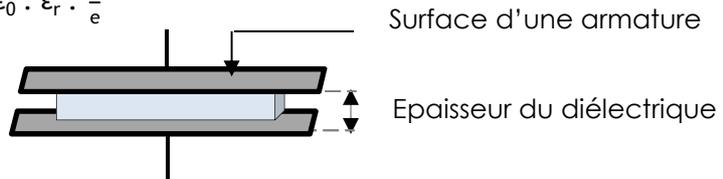


Figure II.1.a : Représentation d'un condensateur plan

2 - Classification et symboles

Les condensateurs sont désignés en général par la lettre C et peuvent être classés également en deux (02) grandes familles : les condensateurs fixes et les condensateurs variables.

- Les condensateurs fixes :

Un condensateur est dit fixe lorsque la valeur de sa capacité est constante entre ses bornes. Les condensateurs fixes peuvent être classés en deux catégories selon leurs polarités.

- Les condensateurs polarisés (électrolytiques chimiques et au tantale) ;
Présent dans diverses applications telles que les alimentations continues, le symbole de ces condensateurs peut être représenté de différentes manières comme l'illustre la figure II.2.a.



Figure II.2.a : Symboles d'un condensateur polarisé



Figure II.2.b : Condensateur électrolytique chimique

- Les condensateurs non polarisés (céramique, à film plastique, etc.).
Ce sont des condensateurs dont le sens de branchement dans un circuit importe peu. Le symbole d'un condensateur de cette catégorie se présente en général comme suit :

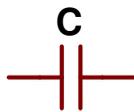


Figure II.2.c : Symbole d'un condensateur non polarisé



Figure II.2.d : Condensateur céramique

- Les condensateurs variables :

Un condensateur est dit variable ou ajustable lorsqu'il offre la possibilité de faire varier manuellement la valeur de la capacité entre ses bornes par le biais d'un curseur.



Figure II.2.e : Symboles d'un condensateur variable



Figure II.2.f : Condensateur rotatif

3 - Fonctions d'un condensateur

Le condensateur est un composant électronique qui permet de réaliser une multitude de fonctions que sont :

❖ **Stockage d'énergie électrique**

Nombreux sont les systèmes électroniques dans lesquels les condensateurs servent de réservoir d'énergie de façon temporaire. L'énergie stockée dans le condensateur est libérée au moment où le circuit de charge est débranché.

❖ **Filtre**

Dans un circuit électronique, le condensateur peut être utilisé pour la sélection de certains signaux électriques en fonction de leur fréquence. En effet, le condensateur se comporte comme un interrupteur ouvert en présence d'un signal continu et comme un interrupteur fermé lorsque le signal est alternatif.

4 - Caractéristiques électriques d'un condensateur

Une résistance, comme tout composant électronique, possède des caractéristiques dont les plus essentielles sont la capacité et la tension de service.

– **La capacité :**

La capacité d'un condensateur est tout simplement la taille de sa réserve de charges électriques. Ce qui veut dire que plus la capacité d'un condensateur est grande, plus il peut contenir de charges électriques. Elle s'exprime en Farads (Ω).

En électronique, on utilise couramment des sous-multiples du farad, le microfarad (μF), le nanofarad (nF) et le picofarad (pF).

Dans la pratique, certaines valeurs de capacités n'existent pas sur le marché et celles indiquées par les constructeurs sur chaque condensateur par le code de couleurs ou par marquage sont appelées valeurs capacitives normalisées.

Exemple : Valeurs normalisées de la série E 6
10 ; 15 ; 22 ; 33 ; 47 ; 68

– **La tension de service :**

La tension de service d'un condensateur est la tension la plus forte qui puisse lui être appliquée sans risque selon les recommandations du fabricant. En dépassant cette tension, il y a risque de détériorer le diélectrique. Il existe également à ce niveau des valeurs normalisées de tension de service.

Exemple : Valeurs normalisées pour les condensateurs électrolytiques chimiques
10V ; 16V ; 25V ; 40V ; 50V ; 63V ; 100V

5 - Groupement de condensateurs

Il peut être utile de recourir à un groupement de condensateur pour plusieurs raisons parmi lesquelles nous pouvons citer :

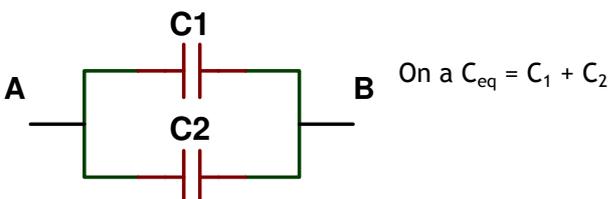
- L'obtention d'une valeur de condensateur qui n'existe pas dans les valeurs normalisées produites par l'industrie ;
- La gestion de l'encombrement.

Il existe 2 types de groupement de condensateurs : le regroupement série et le regroupement parallèle.

❖ **Le regroupement série**



❖ **Le regroupement parallèle**



CHAPITRE II : LA THÉORIE DES SEMI-CONDUCTEURS

Objectifs du cours :

- Etre capable de comprendre le passage d'un semi-conducteur à une jonction PN ;
- Etre capable de comprendre le principe de fonctionnement des composants électroniques à base de jonction PN (diodes, transistors, etc.).

Prérequis :

- Notions générales de la chimie

Durée du cours : 1 Heure 30

I- GÉNÉRALITÉS

1 - La matière

Une matière (ou un corps) est constituée d'un ensemble de molécules. Les molécules à leurs tours sont constituées de plusieurs atomes.

✓ **L'atome :**

C'est la plus petite particule d'un élément qui puisse entrer dans la constitution d'une molécule. Elle est constituée d'électrons de charge négative $q = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C et de masse $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg gravitant autour d'un noyau constitué de protons et de neutrons.

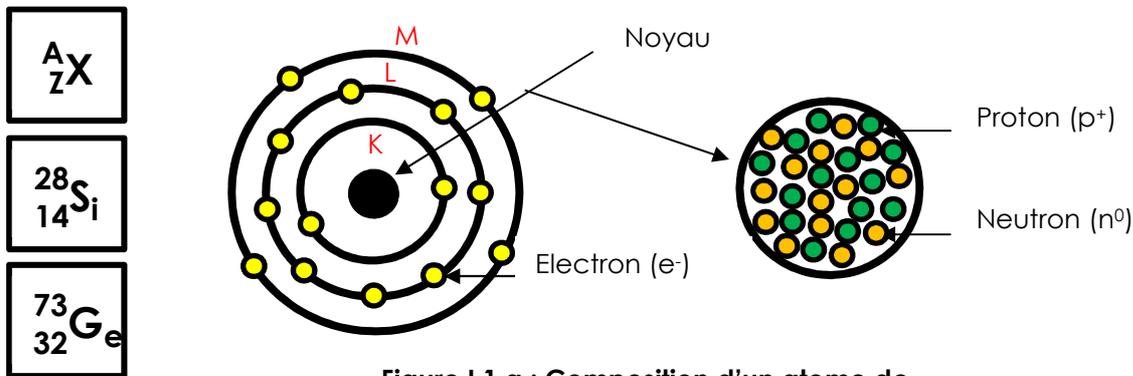


Figure I.1.a : Composition d'un atome de

✓ **La disposition des électrons :**

Les électrons sont rangés au niveau de l'atome par couches électroniques. La couche la plus proche du noyau est la couche K. Ensuite, nous avons les couches L, M, N, etc. Ces couches électroniques lorsqu'elles sont saturées admettent théoriquement en s'éloignant du noyau un nombre d'électrons égal à $2n_i^2$.

$n_1 = 1$ (K) $\rightarrow 2e^-$	$n_3 = 3$ (M) $\rightarrow 18e^-$	$n_5 = 5$ (O) $\rightarrow 50e^-$	$n_7 = 7$ (Q) $\rightarrow 98e^-$
$n_2 = 2$ (L) $\rightarrow 8e^-$	$n_4 = 4$ (N) $\rightarrow 32e^-$	$n_6 = 6$ (P) $\rightarrow 72e^-$	

Les électrons de la dernière couche, appelés électrons périphériques sont à la base de la circulation du courant électrique dans une matière.

2 - La théorie des bandes d'énergie

La théorie des bandes d'énergie est une modélisation des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un solide à l'intérieur de celui-ci. Cette théorie des bandes met essentiellement en évidence trois (03) bandes d'énergie : La bande de valence, la bande de conduction et la bande interdite.

✓ **La bande d'énergie**

Dans un atome isolé, les électrons appartenant à une même couche possèdent une valeur d'énergie appelée niveau d'énergie. Lorsque la matière se constitue, des liaisons naissent entre les atomes et des niveaux d'énergie très voisins apparaissent. L'ensemble de ces niveaux d'énergie très proches est appelé bande d'énergie.

✓ **La bande de valence (BV)**

C'est la bande d'énergie formée par les électrons périphériques des atomes qui sont dans un état lié avec d'autres atomes de la matière.

✓ **La bande de conduction (BC)**

C'est la bande d'énergie formée par les électrons périphériques qui circulent librement dans la matière.

✓ **La bande interdite (BI)**

C'est la différence ou l'écart entre la bande de valence et la bande de conduction. L'énergie qui sépare ces deux bandes est appelée Gap (EG) et elle s'exprime en électron volt (eV).

1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

Selon cette théorie des bandes on distingue 3 types de corps (conducteurs, semi-conducteurs et isolants) en fonction de la configuration des bandes d'énergie et de la valeur du Gap. Les différentes configurations possibles de ces bandes sont :

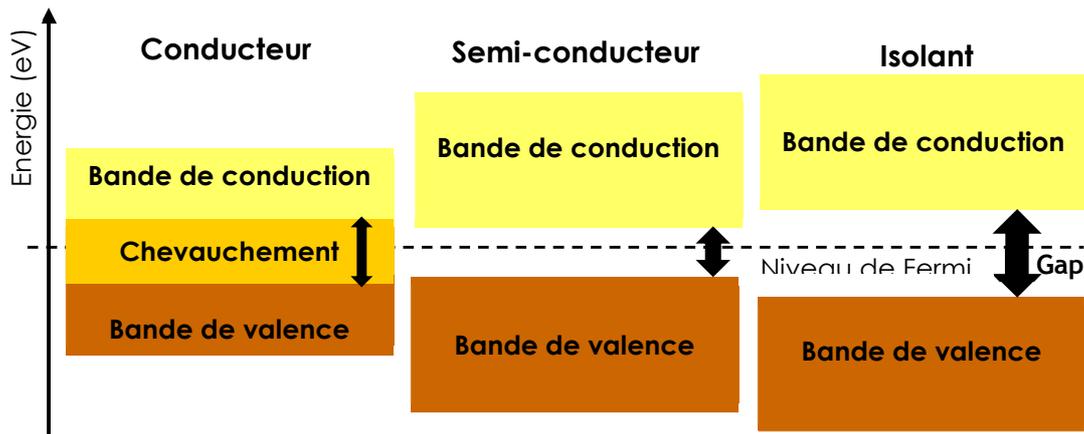


Figure I.2.a : Configurations des bandes d'énergie en fonction du type de corps

II - LES SEMI-CONDUCTEURS

1 - Semi-conducteurs intrinsèques ou purs

Il existe trois (03) types de corps :

✓ **Le conducteur :**

C'est un corps dans lequel des électrons sont libres de se déplacer ($EG = 0$ eV). De ce fait, ce corps est capable de conduire le courant électrique. La résistance du conducteur augmente avec la température.

✓ **L'isolant :**

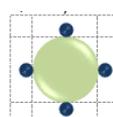
C'est un corps dans lequel les électrons participent à la cohésion du cristal et sont liés à leur atome d'origine ($EG > 7$ eV). Sous l'action d'une énergie extérieure, certains électrons peuvent se libérer. La résistance d'un isolant diminue avec la température.

✓ **Le semi-conducteur :**

C'est un isolant dont l'apport de très peu d'énergie est suffisant pour le rendre conducteur. L'apport d'énergie extérieure peut se faire par excitation thermique (exemple par chauffage). En se référant au tableau de classification périodique des éléments de MENDELEÏEV, les semi-conducteurs figurent dans la colonne IV A (Voir page suivante).

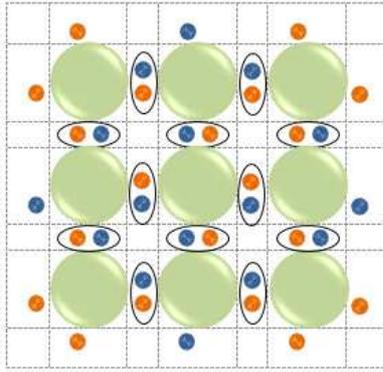
De par leur position dans le tableau de MENDELEÏEV, les semi-conducteurs sont des corps de valence 4 c'est-à-dire qu'ils disposent de 4 électrons sur leur dernière couche électronique. Ces semi-conducteurs sont dits intrinsèques car ils sont à l'état pur. Ils ne comportent donc aucune impureté.

Pour la suite du cours, nous nous intéresserons principalement aux deux semi-conducteurs les plus utilisés en électronique : le Silicium ($EG = 1,12$ eV) et le Germanium ($EG = 0,66$ eV).



4 électrons périphériques

Figure II.1.b : Représentation plane d'un atome isolé de semi-conducteur



8 électrons périphériques par atome

Figure II.1.c : Représentation plane des atomes d'un semi-conducteur

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

<http://www.periodni.com/fr/>

PERIODE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
GRUPE	IA	IIA	IIIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIBB	VIBB	VIBB	VIBB	VIBB	IIIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA		
1	H 1.0079 HYDROGENE	He 4.0026 HELIUM												Li 6.941 LITHIUM	Be 9.0122 BERYLLIUM	B 10.811 BORE	C 12.011 CARBONE	N 14.007 AZOTE	O 15.999 OXYGENE	F 18.998 FLUOR	Ne 20.180 NEON
2	La 138.91 LANTHANE	Ce 140.12 CERUM	Pr 140.91 PRASEODYME	Nd 144.24 NEODYME	Pm 145 PROMETHIUM	Sm 150.36 SAMARIUM	Eu 151.96 EUROPIUM	Gd 157.25 GADOLINIUM	Tb 158.93 TERBIUM	Dy 162.50 DYSPROSIUM	Ho 164.93 HOLMIUM	Er 167.26 ERBIUM	Tm 168.93 THULIUM	Yb 173.05 YTBRIUM	Lu 174.97 LUTETIUM						
3	Fr 223 FRANCIUM	Ra 226 RADIUM	Ac 227 ACTINIUM	Th 232.04 THORIUM	Pa 231.04 PROCTACTINIUM	U 238.03 URANIUM	Np 237 NEPTUNIUM	Pu 239.04 PLUTONIUM	Am 243 AMERICIUM	Cm 247 CURMIUM	Bk 247 BERKELIUM	Cf 251 CALIFORNIUM	Es 252 EINSTEINIUM	Fm 257 FERMIUM	Mendeleevium 288 MELENDELEIEV	No 289 NOBELIUM	Lr 262 LAWRENCIUM				
4	K 39.098 POTASSIUM	Ca 40.078 CALCIUM	Sc 44.956 SCANDIUM	Ti 47.88 TITANE	V 50.94 VANADIUM	Cr 51.996 CHROME	Mn 54.938 MANGANESE	Fe 55.845 FER	Co 58.933 COBALT	Ni 58.693 NICKEL	Cu 63.546 CUIVRE	Zn 65.38 ZINC	Ga 69.723 GALLIUM	Ge 72.64 GERMANIUM	As 74.922 ARSENIC	Se 78.96 SELENIUM	Br 79.904 BROME	Kr 83.798 KRYPTON			
5	Rb 85.468 RUBIDIUM	Sr 87.62 STRONTIUM	Y 88.906 YTRIUM	Zr 91.224 ZIRCONIUM	Nb 92.906 NIOBIUM	Mo 95.96 MOLYBDENE	Tc 98 TECHNETIUM	Ru 101.07 RUTHENIUM	Rh 102.91 RHODIUM	Pd 106.42 PALLADIUM	Ag 107.87 ARGENT	Cd 112.41 CADMIUM	In 114.82 INDIUM	Sn 118.71 ETAIN	Sb 121.76 ANTIMOINE	Te 127.60 TELURE	I 126.905 IODE	Xe 131.29 XEON			
6	Cs 132.91 CESIUM	Ba 137.33 BARYUM	La-Lu lanthanides	Hf 178.49 HAFNIUM	Ta 180.95 TANTALE	W 183.84 WOLYBDATE	Re 186.21 RHENIUM	Os 190.23 OSMIUM	Ir 192.22 IRIDIUM	Pt 195.08 PLATINE	Au 196.97 OR	Hg 200.59 MERCURE	Pb 207.2 PLOMB	Bi 208.98 BISMUTH	Po 209 POLONIUM	At 210 ASTATE	Rn 222 RADON				
7	Fr 223 FRANCIUM	Ra 226 RADIUM	Ac-Lr actinides	Rf 261 RUFBERGIUM	Db 262 DUBNIUM	Sg 266 SEABORGIUM	Bh 264 BOHRLIUM	Hs 277 HASSIUM	Mt 276 MEITNERIUM	Ds 285 DARMSTADTIUM	Rg 289 ROENTGENIUM	Cn 285 COPECANIUM	Fl 289 FLEROVIUM	Uup 289 UNUNPENTIUM	Lv 289 LIVERMORIUM	Uus 289 UNUNSEPTIUM	Uuo 289 UNUNOCTIUM				

Figure II.1.a : Tableau de classification périodique des éléments de MENDELEIEV

2 - Semi-conducteurs extrinsèques

On dit qu'un semi-conducteur est dopé ou extrinsèque lorsque l'on a diffusé des impuretés à l'intérieur de ce semi-conducteur en vue de modifier le nombre des charges mobiles.

Dopage de type N :

Le dopage de type N est l'action qui consiste à injecter des atomes de valence 5 (Colonne V A du tableau de MENDELÉÏEV) dans des semi-conducteurs.

Exemple : Phosphore, atome de valence 5

1 électron supplémentaire

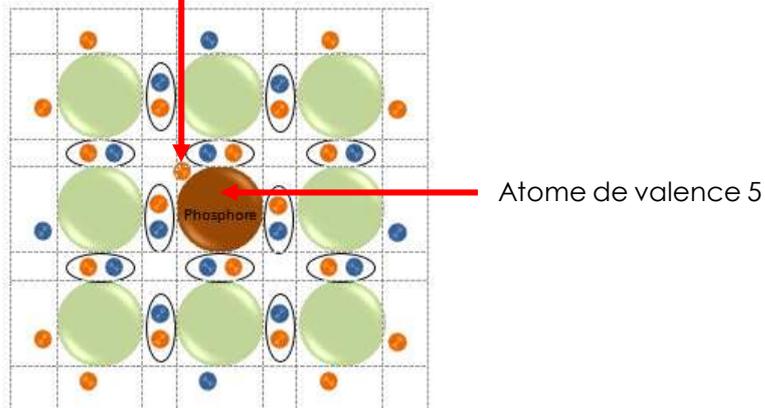


Figure II.1.a : Représentation plane des atomes d'un semi-conducteur dopé en N

Le dopage de type N engendre un électron supplémentaire qui ne participe pas à la cohésion du cristal et donc très peu d'énergie suffit pour rendre le corps conducteur. Le semi-conducteur devient de type N, c'est-à-dire que les porteurs majoritairement présents dans la maille cristalline sont des électrons. Le départ d'un électron laisse un ion positif fixe.

Dopage de type P :

Le dopage de type P est l'action qui consiste à injecter des atomes de valence 3 (Colonne III A du tableau de MENDELÉÏEV) dans des semi-conducteurs.

Exemple : Aluminium, atome de valence 3

1 électron manquant, on dit qu'il y a un trou

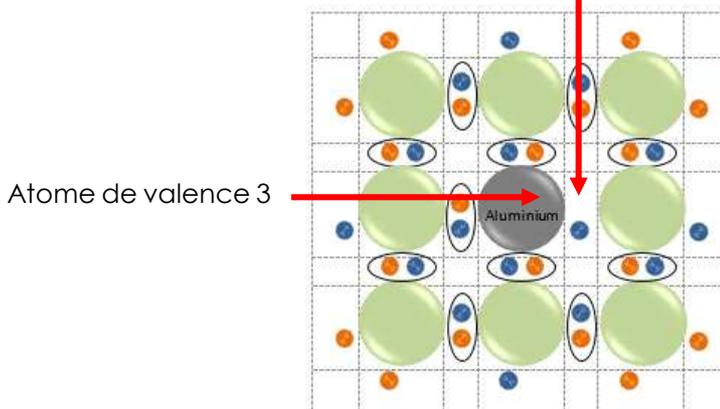


Figure II.2.a : Représentation plane des atomes d'un semi-conducteur dopé en P

Ce type de dopage entraîne un électron en moins. Le départ d'une charge positive (un trou) laisse un ion négatif fixe.

III - JONCTION PN A L'ÉQUILIBRE

Une jonction PN est une association de deux semi-conducteurs, l'un dopé en N et l'autre dopé en P. Pour des questions de compréhension, on adoptera les désignations suivantes :

Un électron Un trou Un ion positif Un ion négatif

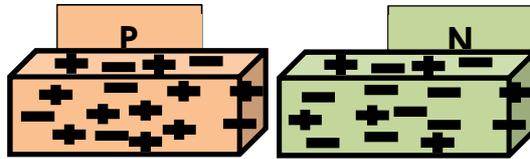


Figure III.a : Jonctions P et N indépendantes

❖ **Dopage de type P :**

- Porteur majoritaires : Trous
- Porteur minoritaire : Electrons

❖ **Dopage de type N :**

- Porteurs majoritaires : Electrons
- Porteurs minoritaires : Trous

1 - Phénomène de diffusion - Zone de déplétion

Le phénomène de diffusion est la tendance à aller là où il y a de la place disponible. En effet, lorsque deux jonctions l'une de type P et l'autre de type N sont mises en contact, les électrons majoritaires du côté N migrent vers la zone P où ils sont minoritaires tandis que les trous majoritaires du côté P migrent vers la zone N où ils sont minoritaires.

Ce faisant, ils laissent derrière eux des ions fixes positifs et négatifs.

Les trous qui se sont déplacés vers la zone N se recombinaient avec les électrons libres de cette zone. Quant aux électrons qui se sont déplacés vers la zone P ils se recombinaient avec les trous de cette zone.

Il y a donc création au niveau de la jonction d'une zone dépourvue d'électrons (coté N) et de trous (coté P) mais qui ne contient que des ions fixes positifs (coté N) et négatifs (coté P) : C'est la zone de déplétion.

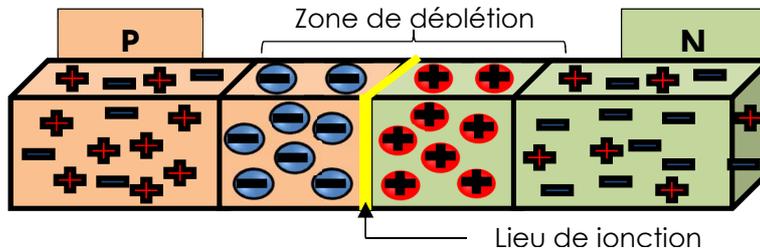


Figure III.1.a : création de la zone de déplétion dans une jonction PN

2 - Apparition d'un champ électrique \vec{E}_{int}

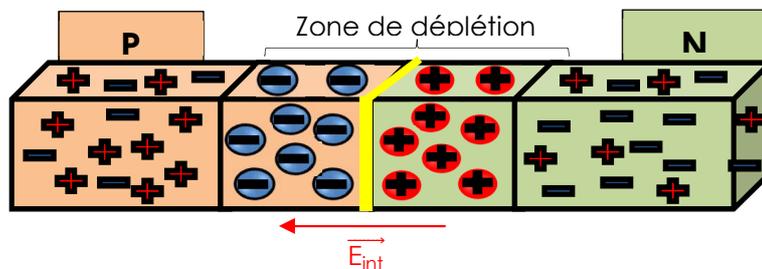


Figure III.2.a : Apparition du champ électrique dans une jonction PN

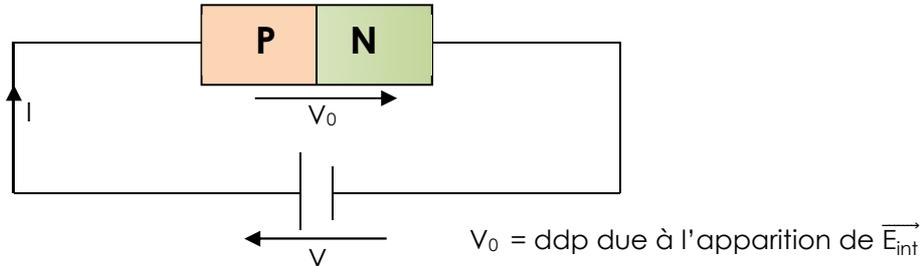
Les ions fixes de la zone de déplétion créent un champ électrique interne \vec{E}_{int} dirigé des ions fixes positifs (+) vers les ions fixes négatifs (-). Ce champ électrique entraîne les électrons de P vers N et

les trous de N vers P s'opposant ainsi au phénomène de diffusion. Ainsi, le phénomène de diffusion et l'action du champ électrique se compensent : On dit que la jonction PN a atteint l'équilibre.

IV - JONCTION POLARISÉE

Polariser une jonction c'est appliquer une tension extérieure aux bornes de la jonction. Lorsque le potentiel le plus élevé (+) de la tension extérieure est appliqué du côté P de la jonction on parle de polarisation directe et lorsqu'il est appliqué du côté N on parle de polarisation inverse.

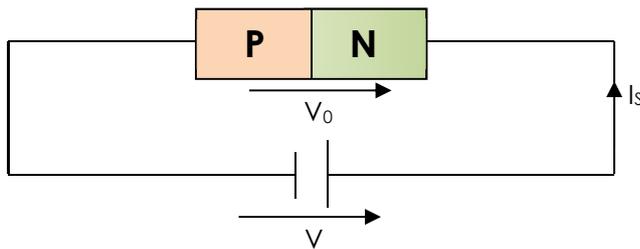
1 - Polarisation directe



En polarisation directe, le champ électrique externe \vec{E}_{ext} créé par le générateur s'oppose au champ électrique interne \vec{E}_{int} . Ainsi, lorsque V devient supérieur à V_0 c'est-à-dire le champ \vec{E}_{ext} domine le champ \vec{E}_{int} , les électrons et les trous majoritaires de la jonction PN migrent respectivement vers le côté P et N.

Il y a donc circulation d'un courant électrique I de P vers N.

2 - Polarisation inverse



En polarisation inverse, le champ électrique externe \vec{E}_{ext} créé par le générateur est dans le même sens que le champ électrique interne \vec{E}_{int} . Ainsi, la résultante de ces deux champs va entrainer les électrons et les trous minoritaires de la jonction PN respectivement vers le côté P et N.

Il y a donc circulation d'un courant électrique I_s de très faible intensité considéré comme nul.

3 - Caractéristique de la jonction PN

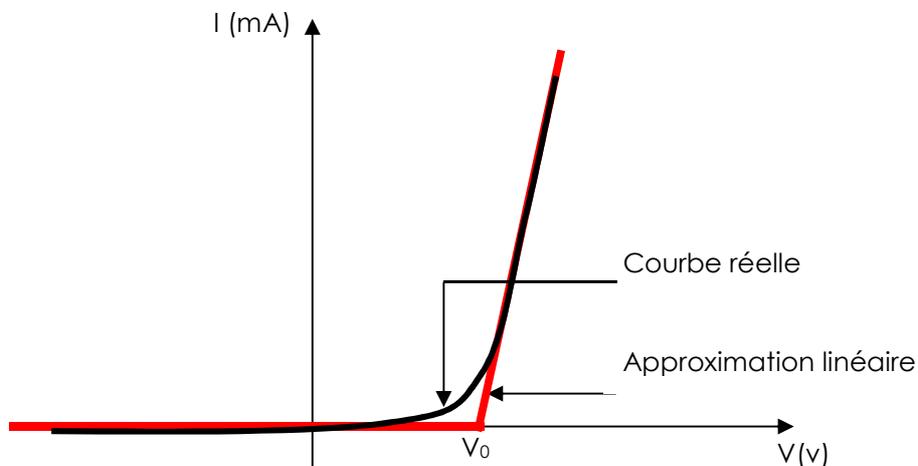


Figure 3.a : Caractéristique $I = f(V)$ d'une jonction PN

CHAPITRE III : LES DIODES

Objectifs du cours :

- Etre capable de définir une diode ;
- Etre capable d'identifier sur un schéma électronique et dans un circuit réel une diode ;
- Connaître les fonctions que peuvent réaliser une diode dans un montage ;
- Connaître les caractéristiques électriques d'une diode ;
- Etre capable d'analyser un montage à base de diode.

Prérequis :

La théorie des semi-conducteurs

Durée du cours : 3 heures

Dans ce cours, on s'intéressera plus particulièrement à la diode à jonction, la diode Zéner et la diode électroluminescente.

I- LA DIODE À JONCTION

1 - Définition

C'est un composant électronique conçu à partir d'une jonction PN et qui se laisse traverser par le courant que dans un seul sens.

2 - Symbole

Le symbole de la diode à jonction se présente comme suit (Figure I.2.a) :

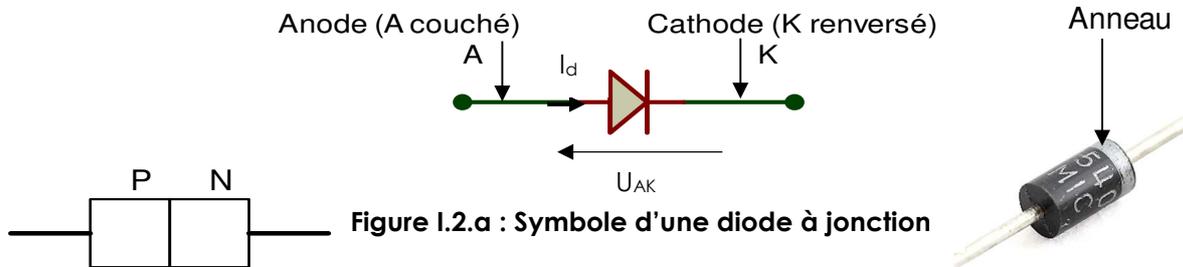


Figure I.2.b : Jonction PN

Figure I.2.c : Diode 1N5400

Le côté P de la jonction PN désigne l'anode et le côté N la cathode. Dans la réalité, l'identification des bornes de la diode à jonction se fait à partir de l'anneau qui est plus proche de la cathode (Figure I.2.c).

3 - Fonction

La diode à jonction est un composant électronique dont le fonctionnement est similaire à celui d'un commutateur (interrupteur). Son état dépend de la tension U_{AK} à ses bornes. Ainsi, la diode à jonction peut être :

- ✓ Soit dans un état passant c'est-à-dire $U_{AK} > V_d$ et $I_d > 0$;
- ✓ Soit dans un état bloqué c'est-à-dire $U_{AK} \leq V_d$ et $I_d = 0$.

I_d : Courant traversant la diode à jonction dans le sens anode - cathode (sens direct).

V_d : Tension seuil de la diode à jonction. Elle est donnée par le constructeur du composant.

U_{AK} : Tension aux bornes de la diode à jonction dans un circuit électronique.

La diode à jonction est donc un commutateur commandé par la tension U_{AK} .

4 - Caractéristique d'une diode à jonction

Le montage ci-dessous (Figure I.3.a) permet de déterminer à partir d'un relevé point à point la caractéristique réelle $I = f(U)$ de la diode à jonction D.

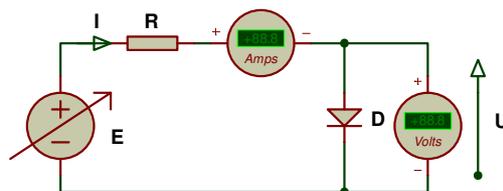


Figure I.3.a : Montage donnant la caractéristique réelle $I = f(U)$

En observant la caractéristique réelle $I = f(U)$ de la diode D, on distingue deux (02) régions de fonctionnement :

- ✓ La région directe (diode polarisée en direct) ;
- ✓ La région inverse (diode polarisée en inverse).

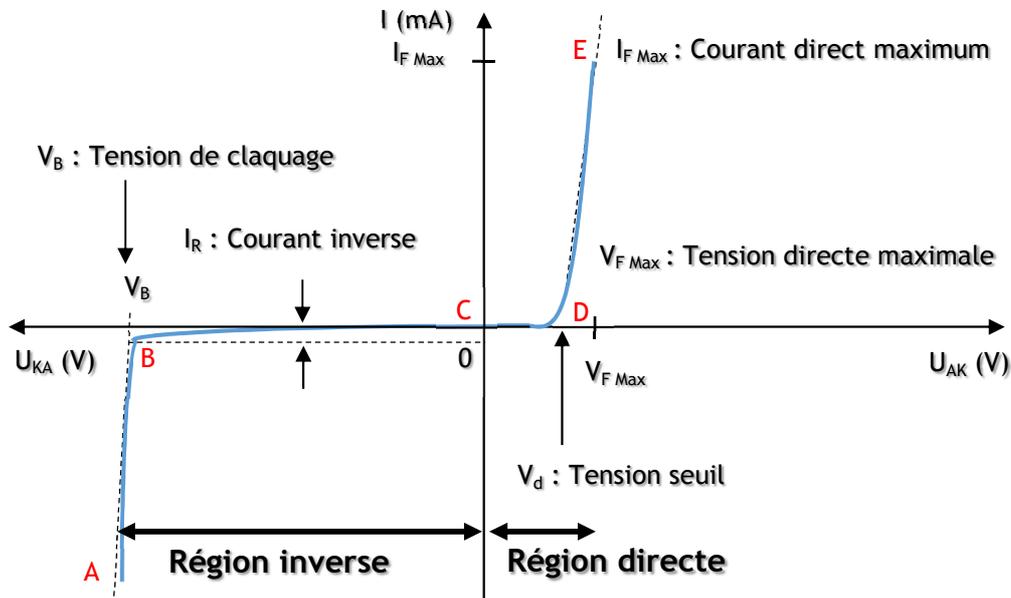


Figure I.3.b : Allure de la caractéristique réelle $I = f(U)$ d'une diode à jonction

Zone CD : la diode à jonction est polarisée en direct mais la tension à ses bornes est encore faible pour vaincre la barrière de potentiel V_d . En plus, le courant traversant la diode dans le sens direct est encore négligeable voire nul. Dans cette zone, la diode est dans un état bloqué : c'est la zone de blocage de la région directe.

Zone DE : la barrière de potentiel V_d est franchie et le courant traversant la diode en polarisation directe évolue de manière exponentielle pour une très faible augmentation de la tension U_{AK} . Dans cette zone, la diode est dans un état passant c'est-à-dire qu'elle est conductrice de courant : c'est la zone de conduction de la région directe.

Zone BC : la diode à jonction est polarisée en inverse et le courant qui la traverse est négligeable voire nul malgré une augmentation considérable de la valeur de la tension U_{KA} . Dans cette zone, la diode est dans un état bloqué : c'est la zone de blocage de la région inverse.

Zone AB : au-delà de la tension V_B en polarisation inverse, le courant traversant la diode à jonction augmente très brusquement. Dans cette zone qui correspond à la zone de claquage de la région inverse, il y a destruction de la diode par le phénomène d'avalanche.

En effet, quand le champ électrique au niveau de la jonction devient trop intense, les électrons accélérés peuvent ioniser des atomes par chocs, ce qui libère d'autres électrons qui sont à leur tour accélérés. Le courant devient alors très important en un temps extrêmement court.

La caractéristique réelle $I = f(U)$ est exponentielle et s'écrit $I = I_s \left(e^{\frac{U}{V_T}} - 1 \right)$ avec $V_T = \frac{KT}{q}$

V_T : Tension de température. À 25°C, $V_T \approx 26$ mV.

K : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹

T : Température absolue ($T(^{\circ}K) = 273 + t(^{\circ}C)$)

q : Charge d'un électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C

η : Facteur technologique dépendant du matériau (η est compris en 1 et 2).

I_s : Courant inverse de saturation ($\approx I_R$)

La diode à jonction est donc un composant électronique non linéaire et elle est conçue pour fonctionner essentiellement dans la région directe. Les caractéristiques électriques de cette diode sont principalement le courant inverse, la tension de claquage, la tension seuil, la résistance dynamique et les valeurs maximales $V_{F Max}$ et $I_{F Max}$ en polarisation directe.

❖ **Courant inverse I_R**

Lorsqu'une diode à jonction est polarisée en inverse, un très petit courant circule de la cathode vers l'anode. Ce petit courant est appelé courant inverse et noté I_R .

La valeur du courant inverse peut être influencée par la température mais aussi par un champ électrique trop intense au niveau de la jonction (phénomène d'avalanche).

Pour les diodes au Silicium I_R double tous les 10°C et pour le Germanium tous les 6°C .

Exemple : Diodes 1N914 et 1N4148, à $T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C}$, pour $V_R = 20\text{ V}$, $I_R = 25\text{ nA}$.

Les diodes à jonction sont fabriquées de sorte à ce que le courant inverse soit suffisamment petit pour être ignoré dans une quelconque application.

❖ **Tension de claquage V_B**

Lorsqu'une diode à jonction est polarisée en inverse, la tension à ses bornes est appelée tension inverse V_R . L'augmentation de cette tension inverse permet d'atteindre une valeur V_B à partir de laquelle la diode conduit fortement le courant et est détruite par dissipation excessive. Cette valeur V_B est appelée tension de claquage de la diode.

Les concepteurs de ces diodes choisissent délibérément une tension de claquage supérieure à la tension inverse nominale escomptée en fonctionnement normal.

❖ **Tension seuil ou tension de coude V_d**

En polarisation directe, la diode ne conduit pas fortement tant que la barrière de potentiel V_d (environ $0,6\text{ V}$ pour le Silicium et $0,3\text{ V}$ pour le Germanium) n'est pas surmontée.

Au-delà de cette valeur V_d , une petite augmentation de la tension produit une forte augmentation du courant. La tension à partir de laquelle le courant commence à augmenter fortement s'appelle la tension de coude ou la tension seuil.

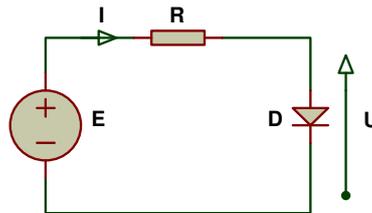
❖ **Résistance dynamique R_d**

La résistance dynamique d'une diode à jonction est l'inverse de la pente de la caractéristique réelle $I = f(U)$ au point de fonctionnement.

❖ **Valeurs maximales en polarisation directe ($V_{F\text{ Max}}$; $I_{F\text{ Max}}$)**

La tension directe maximale $V_{F\text{ Max}}$ et le courant direct maximum $I_{F\text{ Max}}$ font parties des caractéristiques directes d'une diode à jonction. Ces valeurs sont données par le constructeur.

La connaissance de la caractéristique réelle $I = f(U)$, fondamentale pour décrire le comportement d'une diode, ne permet malheureusement pas de résoudre analytiquement un circuit constitué simplement d'un générateur E , d'une résistance R et une diode D .



Les équations décrivant ce circuit sont en effet non linéaires et ne peuvent pas être résolues simplement.

Une approximation linéaire de la caractéristique réelle $I = f(U)$ de la diode à jonction s'avère donc nécessaire afin de résoudre analytiquement un circuit à diode.

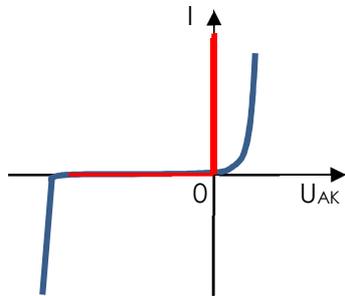
5 - Approximation linéaire d'une diode à jonction

Faire une approximation linéaire de la caractéristique réelle $I = f(U)$ d'une diode, c'est linéariser plus ou moins grossièrement cette caractéristique réelle de la diode afin de trouver un schéma électrique constitué de composants électriques linéaires permettant d'obtenir cette caractéristique linéarisée. En fonction du problème électronique à résoudre, on distingue trois types approximations linéaires.

- L'approximation idéale ;
- L'approximation parfaite ;
- L'approximation réelle.

5-1- Première approximation : Diode à jonction idéale

La première approximation linéaire consiste à négliger la tension seuil V_d et la résistance dynamique R_d de la diode à jonction. Dans cette configuration, la diode est dite idéale ($V_d = 0\text{ V}$; $R_d = 0\ \Omega$) et sa caractéristique linéarisée se présente comme suit :



- Lorsque $U_{AK} < 0\text{ V}$, le courant $I = 0\text{ mA}$: Interrupteur ouvert
- Lorsque le courant $I > 0\text{ mA}$, $U_{AK} = 0\text{ V}$: Interrupteur fermé

Une diode à jonction idéale est alors équivalente soit à un interrupteur ouvert, soit à un interrupteur fermé.

Figure I.5.1a : Caractéristique $I = f(U)$ d'une diode à jonction idéale

Le schéma électrique équivalent d'une diode à jonction idéale :

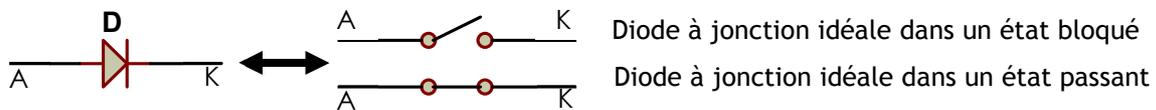
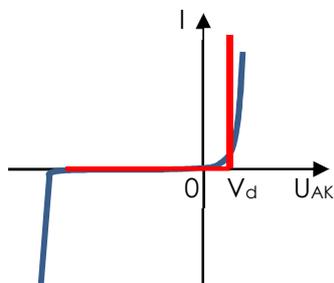


Figure I.5.1.b : Schéma électrique équivalent d'une diode à jonction idéale

La première approximation est utilisée en général pour expliquer le principe de fonctionnement d'un circuit électronique comportant une diode à jonction ou dans un circuit électronique où les tensions sont élevées (plus de 10 V) vis-à-vis de la tension seuil.

5-2- Deuxième approximation : Diode à jonction parfaite

La deuxième approximation linéaire consiste à négliger la résistance dynamique R_d de la diode à jonction mais en prenant en compte sa tension seuil V_d . Dans cette configuration, la diode est dite parfaite ($V_d = 0,6\text{ V}$; $R_d = 0\ \Omega$) et sa caractéristique linéarisée se présente comme suit :



- Lorsque $U_{AK} < V_d$, le courant $I = 0\text{ mA}$: Interrupteur ouvert
- Lorsque le courant $I > 0\text{ mA}$, $U_{AK} = V_d$: Batterie de tension V_d

Une diode à jonction parfaite est alors équivalente soit à un interrupteur ouvert, soit à une batterie de tension V_d .

Figure I.5.2a : Caractéristique $I = f(U)$ d'une diode à jonction parfaite

Le schéma électrique équivalent d'une diode à jonction parfaite :

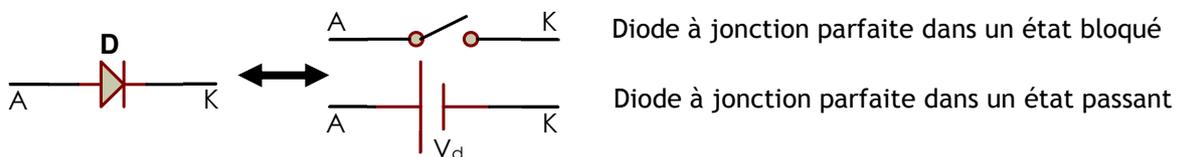
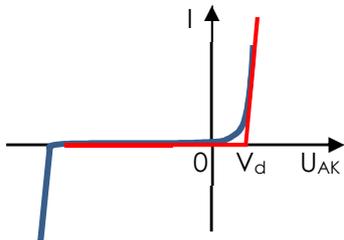


Figure I.5.2.b : Schéma électrique équivalent d'une diode à jonction parfaite

La deuxième approximation est utilisée pour des calculs où l'on recherche une certaine précision. Elle est en général employée dans un circuit électronique présentant de faibles tensions (moins de 10 V) ou lorsque le courant dans le circuit est faible devant le courant direct maximum de la diode.

5-3- Troisième approximation : Diode à jonction réelle

La troisième approximation linéaire consiste à prendre en compte la tension seuil V_d et la résistance dynamique R_d de la diode à jonction. Dans cette configuration, la diode est dite réelle ($V_d = 0,6 \text{ V}$; $R_d \neq 0 \Omega$) et sa caractéristique linéarisée se présente comme suit :



- Lorsque $U_{AK} < V_d$, le courant $I = 0 \text{ mA}$: Interrupteur ouvert
- Lorsque le courant $I > 0 \text{ mA}$, $U_{AK} = V_d + R_d \cdot I$: Batterie de tension V_d en série avec une résistance R_d .

Une diode à jonction réelle est alors équivalente soit à un interrupteur ouvert, soit à une batterie de tension V_d en série avec une résistance R_d .

Figure I.5.3a : Caractéristique $I = f(U)$ d'une diode à jonction réelle

Le schéma électrique équivalent d'une diode à jonction réelle :

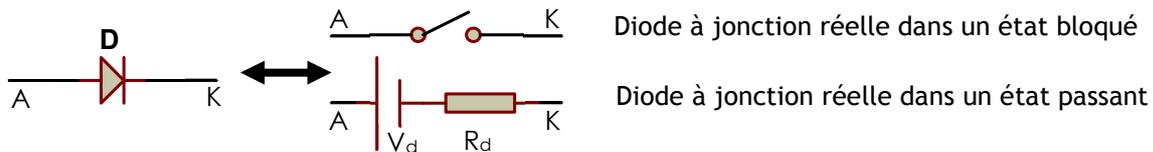


Figure I.5.2.b : Schéma électrique équivalent d'une diode à jonction réelle

La troisième approximation est en général utilisée dans un circuit électronique présentant de faibles tensions (moins de 10 V) mais des courants importants. Dans ce cas, on peut déterminer la résistance extrinsèque de la diode par approximation via la relation $R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$.

Remarque :

Le choix d'un type d'approximation dépend de la valeur des tensions présentes dans le circuit, de la fonction du circuit à diode ou encore des courants circulant dans le circuit. Toutefois, la deuxième approximation est le meilleur compromis pour la plupart des applications pratiques et nous l'utiliserons **sauf indication contraire**.

6 - Groupement de diodes à jonction

Il peut être utile de recourir à un groupement de diodes pour plusieurs raisons parmi lesquelles nous pouvons citer :

- L'obtention d'une certaine valeur de tension seuil V_d ;
- La limitation du courant traversant une diode ;
- La gestion de l'encombrement.

Il existe 2 types de groupement de diodes : le regroupement série et le regroupement parallèle.

❖ Le regroupement série

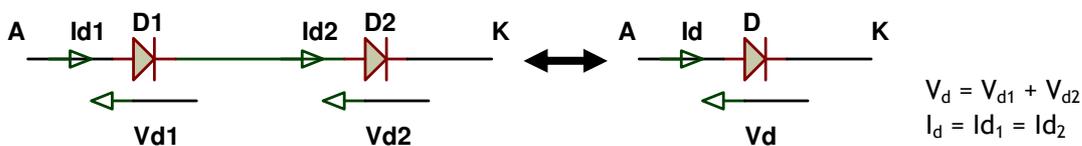


Figure I.6.a : Diodes en série

❖ Le regroupement parallèle (Diodes identiques)

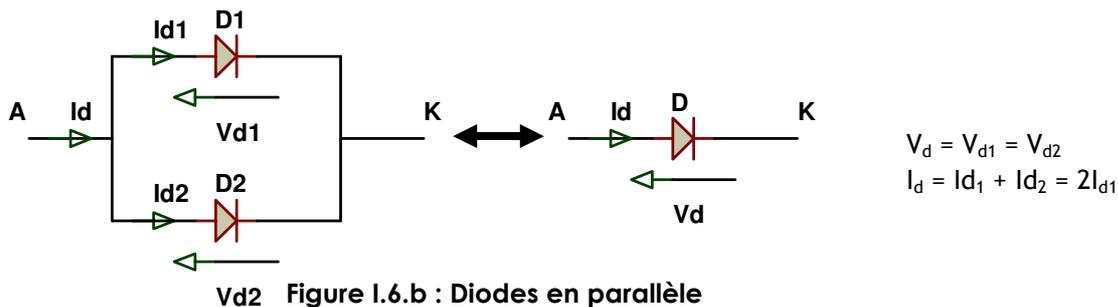


Figure I.6.b : Diodes en parallèle

7 - Méthodologie d'analyse de circuits à base de diode à jonction

En régime statique : la tension et le courant sont des grandeurs constantes

Pour analyser un circuit à base de diode à jonction en régime statique, l'on peut procéder comme suit :

- ✓ **Déterminer le type d'approximation linéaire**
 - Diode idéale ($V_d = 0 \text{ V}$; $R_d = 0 \Omega$) ;
 - Diode parfaite ($V_d = 0,6 \text{ V}$; $R_d = 0 \Omega$) ;
 - Diode réelle ($V_d = 0,6 \text{ V}$; $R_d \neq 0 \Omega$).
- ✓ **Faire une hypothèse sur l'état de la diode**
 - Diode dans un état bloqué ;
 - Diode dans un état passant.
- ✓ **Ecrire l'égalité correspondante**
 - $I_d = 0 \text{ mA}$ si la diode est dans un état bloqué ;
 - $U_{AK} = R_d \cdot I_d + V_d$ si la diode est dans un état passant.

✓ **Remplacer la diode par son schéma électrique équivalent**

On représentera sur le schéma électrique équivalent de la diode les bornes A (Anode) et K (cathode), le courant direct I_d et la tension U_{AK} .

- ✓ **Vérifier l'inégalité définissant l'état de la diode**
 - Diode bloquée $U_{AK} \leq V_d$
 - Diode passante $I_d > 0 \text{ mA}$

En régime dynamique : la tension et le courant évoluent en fonction du temps.

Pour analyser un circuit à base de diode à jonction en régime dynamique, l'on peut, pour chaque alternance (cas général) du signal d'entrée $V_e(t)$, procéder comme suit :

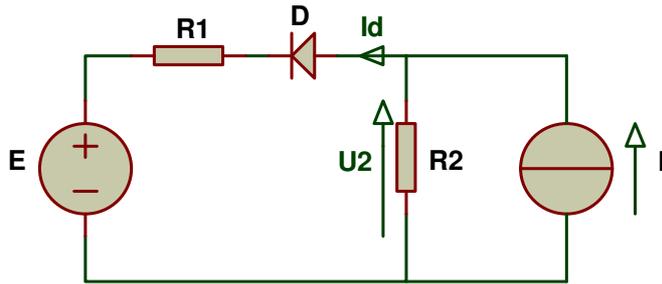
- ✓ **Déterminer le type d'approximation linéaire**
 - Diode idéale ($V_d = 0 \text{ V}$; $R_d = 0 \Omega$) ;
 - Diode parfaite ($V_d = 0,6 \text{ V}$; $R_d = 0 \Omega$) ;
 - Diode réelle ($V_d = 0,6 \text{ V}$; $R_d \neq 0 \Omega$).
- ✓ **Identifier l'état susceptible de la diode**
 - Diode dans un état passant si le courant $I_d > 0 \text{ mA}$;
 - Diode dans un état bloqué si le courant $I_d \leq 0 \text{ mA}$.
- ✓ **Faire un groupement si possible des diodes ayant le même état**
- ✓ **Remplacer la diode par son schéma électrique équivalent**

On représentera sur le schéma électrique équivalent de la diode les bornes A (Anode) et K (cathode), le courant direct I_d et la tension U_{AK} .

- ✓ **Déterminer à partir des méthodes de résolution de circuit, la relation entre $V_e(t)$ et U_{AK} lorsqu'on se place à la limite du blocage de la diode c'est-à-dire $I_d(t) = 0 \text{ mA}$.**
- ✓ **Déterminer la condition sur $V_e(t)$ pour que la diode soit dans un état passant**
- ✓ **Déterminer les intervalles de temps de conduction et de blocage des diodes**
- ✓ **Dresser un tableau récapitulatif de l'état de la diode sur une période de $V_e(t)$**

Exercice d'application I.1 :

On souhaite étudier le circuit électronique à diode ci-dessous.

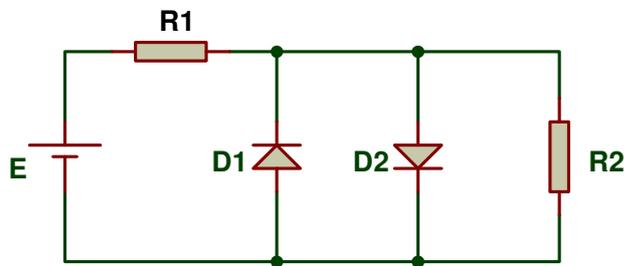


D est une diode à jonction telle que $V_d = 0,6 \text{ V}$.
Déterminer la tension U_2 aux bornes de la résistance R_2 .

On prendra : $R_1 = 330 \Omega$; $R_2 = 820 \Omega$; $E = 10 \text{ V}$; $I = 10 \text{ mA}$.

Exercice d'application I.2 :

Soit le circuit électronique ci-dessous.

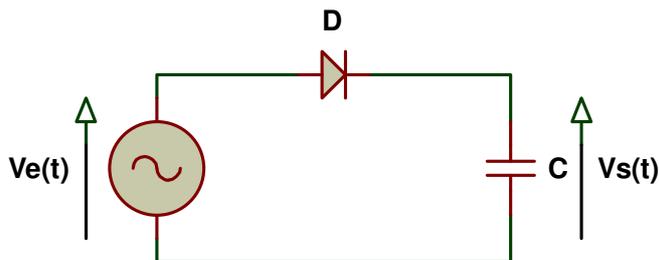


On donne : $E = 9 \text{ V}$; $R_1 = 220 \Omega$ et $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$.
On admet que les diodes D_1 et D_2 sont identiques et idéales.

Calculer la puissance dissipée par chaque résistance du circuit.

Exercice d'application I.3 :

Soit le circuit électronique ci-dessous.



La diode D est supposée idéale.

On donne : $C = 470 \mu\text{F}$ et $V_e(t) = 5 \text{ V Sin}(100\pi t)$.

- 1 - Représenter l'oscillogramme de $V_e(t)$
- 2 - Expliquer le fonctionnement du circuit.
- 3 - Sans démontrer, donner l'état de la diode D.
- 4 - Représenter sur le même graphe que $V_e(t)$ l'oscillogramme de $V_s(t)$.
- 5 - Quelle fonction réalise le condensateur C.

II - LA DIODE ZÉNER

1 - Définition

Une diode Zéner est un composant électronique conçu également à partir d'une jonction PN qui, à la différence d'une diode à jonction en polarisation inverse, se laisse traverser par un courant non négligeable à partir d'une certaine tension appelée tension Zéner sans être endommager. En effet, cette diode au Silicium est fabriquée pour fonctionner principalement dans la région de claquage même si elle se comporte comme une diode à jonction lorsqu'elle est polarisée en direct.

2 - Symbole

Le symbole de la diode Zéner peut se présenter de diverses manières comme le montre la figure II.2.a :

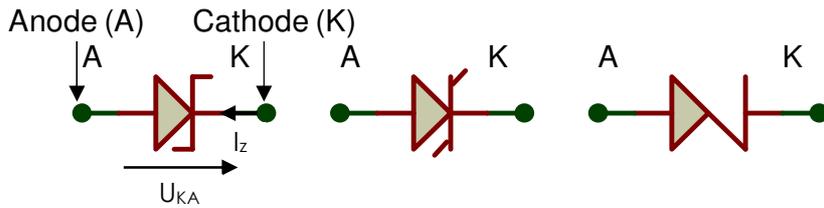


Figure II.2.a : Symboles d'une diode Zéner

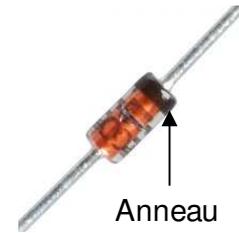


Figure II.2.b : Diode BZX83C9V1

Concernant l'identification de ses bornes de manière pratique l'on se réfère à l'anneau qui est plus proche de la cathode (Figure II.2.b).

3 - Fonction

Parfois appelée diode stabilisatrice de tension, la diode Zéner est un composant électronique dont la principale fonction en polarisation inverse est de maintenir une tension presque constante à ses bornes. Cette fonction de stabilisation de tension est liée à l'état de la diode qui dépend de la tension U_{KA} à ses bornes à vide ($I_z = 0$). Ainsi, la diode Zéner en polarisation inverse peut être :

- ✓ Soit dans un état passant c'est-à-dire $U_{KA} > V_{Z0}$ et $I_z > 0$;
- ✓ Soit dans un état bloqué c'est-à-dire $U_{KA} \leq V_{Z0}$ et $I_z = 0$.

I_z : Courant traversant la diode Zéner dans le sens cathode - anode (sens inverse).

V_{Z0} : Valeur minimale de la tension Zéner de la diode. Elle est donnée par le constructeur du composant.

U_{KA} : Tension aux bornes de la diode Zéner à vide ($I_z = 0$) dans un circuit électronique.

En polarisation directe, la diode Zéner se comporte comme une diode à jonction. Elle réalise dans cette condition la fonction de commutation.

4 - Caractéristique d'une diode Zéner

Le montage ci-dessous (Figure II.2.a) permet de déterminer à partir d'un relevé point à point la caractéristique $I = f(U)$ de la diode Zéner Dz .

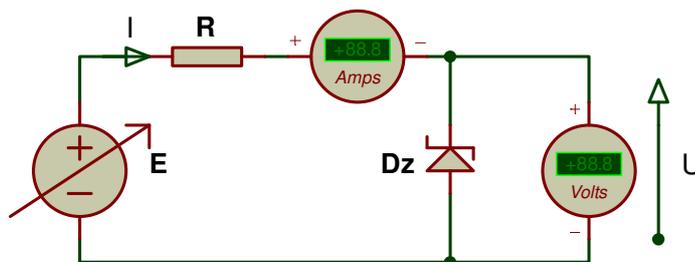


Figure II.4.a : Montage donnant la caractéristique réelle $I = f(U)$ d'une diode Zéner

La caractéristique réelle $I = f(U)$ de la diode Zéner est donnée par la figure II.2.b ci-dessous.

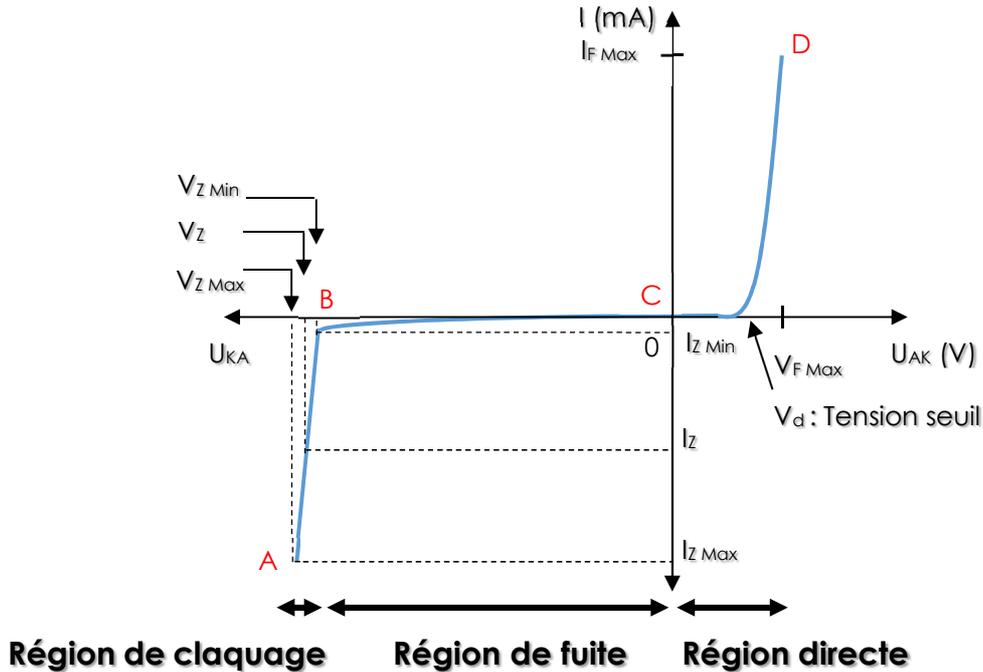


Figure II.4.b : Allure de la caractéristique réelle $I = f(U)$ d'une diode Zéner

En observant l'allure de la caractéristique réelle $I = f(U)$ de la diode D_z , on distingue trois (03) régions de fonctionnement :

- La région directe (CD) ;
- La région de fuite (BC) ;
- La région de claquage (AB).

En faisant varier le niveau de dopage des diodes au Silicium, on obtient des diodes Zéner à tension de claquage comprise entre 2 et 200 V environ.

Dans la région directe, elle commence à conduire à partir d'environ 0,6 V comme une diode au Silicium ordinaire. Dans la région de fuite, le courant inverse est très petit. Et dans la région de claquage la tension est presque constante et vaut moyennement V_Z . Le coude de claquage d'une diode Zéner forme presque un angle droit.

❖ **Valeurs limites**

Habituellement, la fiche signalétique d'une diode Zéner indique les valeurs limites de la tension et du courant Zéner ($V_{Z\ Min}$; $V_{Z\ Max}$; $I_{Z\ Min}$ et $I_{Z\ Max}$) ainsi que la tension Zéner nominale V_Z . La puissance dissipée par une diode Zéner est $P_Z = V_Z \cdot I_Z$. Tant que P_Z est inférieure à la puissance maximale, la diode Zéner peut fonctionner dans la région de claquage sans être détruite. Cette puissance limite pour une diode Zéner commerciale va de 0,25 W à plus de 50 W.

❖ **Résistance Zéner R_Z**

La tension varie légèrement en fonction du courant dans la région de claquage. Il existe donc une petite résistance en série avec V_Z . Cette résistance Zéner R_Z est souvent appelée Impédance Zéner.

Exemple : La diode Zéner 1 N 3020

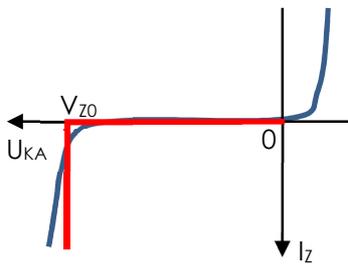
On a $V_Z = 10\ V$, $R_Z = 7\ \Omega$ lorsque le courant I_Z est de 25 mA.

5 - Approximation linéaire d'une diode Zéner

Dans un circuit, une diode Zéner D_z peut être modélisée de différentes manières en fonction de la tension U_{KA} à ses bornes. On s'intéressera principalement à la région inverse de sa caractéristique réelle $I = f(U)$.

5-1- Première approximation en polarisation inverse : Diode Zéner idéale

La première approximation linéaire consiste à négliger la résistance R_Z de la diode Zéner tout en considérant sa tension Zéner. Dans cette configuration, la diode Zéner est dite idéale ($V_{Z0} = V_Z$; $R_Z = 0 \Omega$) et sa caractéristique linéarisée se présente comme suit :



- Lorsque $U_{KA} < V_{Z0}$, le courant $I_Z = 0 \text{ mA}$: Interrupteur ouvert
- Lorsque le courant $I_Z > 0 \text{ mA}$, $U_{KA} = V_{Z0}$: Batterie de tension V_{Z0}

Une diode Zéner idéale est alors équivalente soit à un interrupteur ouvert, soit à une batterie de tension V_{Z0} .

Figure II.5.1.a : Caractéristique $I = f(U)$ d'une diode Zéner idéale

Le schéma électrique équivalent d'une diode Zéner idéale :

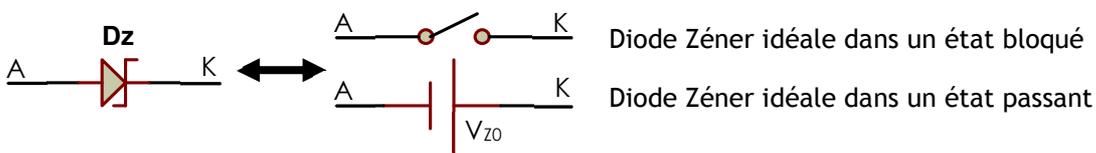
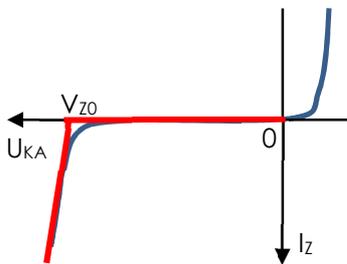


Figure II.5.1.b : Schéma électrique équivalent d'une diode Zéner idéale

La première approximation est utilisée en général pour expliquer le principe de fonctionnement d'un circuit électronique comportant une diode Zéner ou dans un circuit électronique où la tension Zéner de la diode est faible (moins de 5 V).

5-2- Deuxième approximation en polarisation inverse : Diode Zéner réelle

La deuxième approximation linéaire de la diode Zéner consiste à prendre en considération sa résistance R_Z et sa tension Zéner. Dans cette configuration, la diode est dite réelle ($V_{Z0} = V_{Z \text{ Min}}$; $R_Z \neq 0 \Omega$) et sa caractéristique linéarisée se présente comme suit :



- Lorsque $U_{KA} < V_{Z0}$, le courant $I_Z = 0 \text{ mA}$: Interrupteur ouvert
- Lorsque le courant $I_Z > 0 \text{ mA}$, $U_{KA} = V_{Z0} + R_Z \cdot I_Z$: Batterie de tension V_{Z0} en série avec une résistance R_Z .

Une diode réelle est alors équivalente soit à un interrupteur ouvert, soit à une batterie de tension V_{Z0} en série avec une résistance R_Z .

Figure II.5.2.a : Caractéristique $I = f(U)$ d'une diode Zéner réelle

Le schéma électrique équivalent d'une diode Zéner réelle :

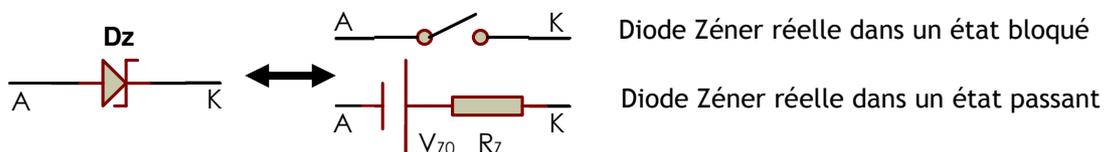


Figure II.5.2.b : Schéma électrique équivalent d'une diode Zéner réelle

La deuxième approximation est en général utilisée dans un circuit électronique présentant une tension Zéner élevée (plus de 5 V) ou lorsque la tension aux bornes de la diode Zéner à vide est suffisamment grande devant V_Z . Dans ce cas, la détermination de la valeur de la résistance Zéner s'avère nécessaire.

Remarque :

En polarisation directe, la diode Zéner est équivalente à une diode à jonction. Dans cette situation, les différentes approximations d'une diode à jonction restent valables pour une diode Zéner.

6 - Groupement de diodes Zéner

Il peut être utile de recourir à un groupement de diodes pour plusieurs raisons parmi lesquelles nous pouvons citer :

- L'obtention d'une certaine valeur de tension Zéner V_Z ;
- La limitation du courant traversant une diode ;
- La gestion de l'encombrement.

Il existe 2 types de groupement de diodes : le regroupement série et le regroupement parallèle.

❖ Le regroupement série

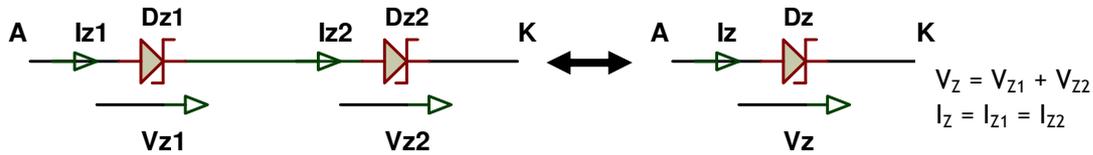


Figure II.6.a : Diodes en série

❖ Le regroupement parallèle (Diodes identiques)

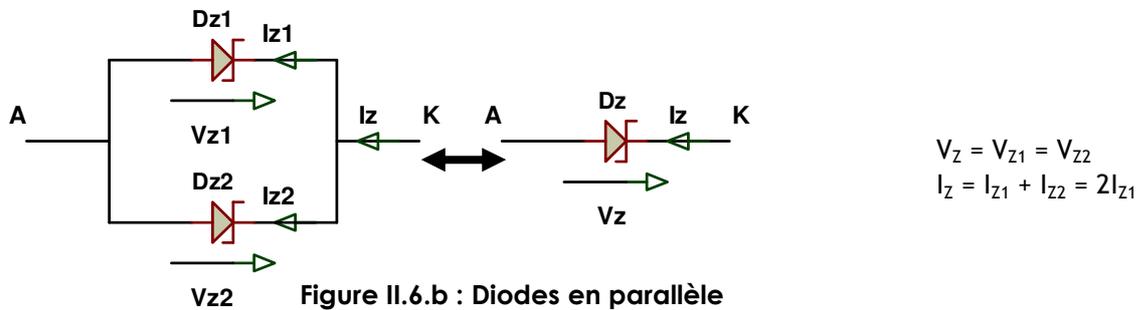


Figure II.6.b : Diodes en parallèle

7 - Méthodologie d'analyse de circuits à base de diode Zéner

Pour analyser un circuit à base de diode Zéner, l'on peut procéder comme suit :

- ✓ Déterminer le type d'approximation linéaire
 - Diode idéale ($V_{Z0} = V_Z$; $R_Z = 0 \Omega$) ;
 - Diode réelle ($V_{Z0} = V_{Z \text{ Min}}$; $R_Z \neq 0 \Omega$).
- ✓ Faire une hypothèse sur l'état de la diode
 - Diode dans un état bloqué (Hypothèse la plus utilisée) ;
 - Diode dans un état passant.
- ✓ Ecrire l'égalité correspondante
 - $I_Z = 0 \text{ mA}$ si la diode est dans un état bloqué ;
 - $U_{KA} = R_Z \cdot I_Z + V_{Z0}$ si la diode est dans un état passant.

✓ Remplacer la diode par son schéma électrique équivalent
On représentera sur le schéma électrique équivalent de la diode les bornes A (Anode) et K (cathode), le courant Zéner I_Z et la tension U_{KA} .

- ✓ Vérifier l'inégalité définissant l'état de la diode
 - Diode bloquée $U_{KA} \leq V_{Z0}$
 - Diode passante $I_Z > 0 \text{ mA}$

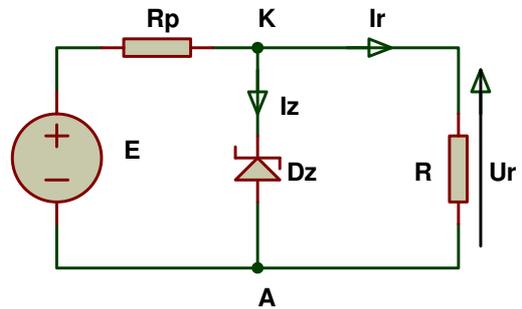
Exercice d'application II.1 :

Soit le circuit électronique ci-contre. On souhaite déterminer l'état de la diode D_z et la tension U_R aux bornes de la résistance R selon les valeurs de la tension E .

On donne : $R_p = 330 \Omega$, $R = 1 \text{ k}\Omega$ et D_z (BZX83C10V ; $V_{Z \text{ Min}} = 9,4 \text{ V}$; $V_{Z \text{ Max}} = 10,6 \text{ V}$ et $R_Z = 6,8 \Omega$).

1ère PARTIE : Diode Zéner réelle

- 1- Pour $E = 12 \text{ V}$:
 - a. Déterminer l'état de la diode D_z .
 - b. Déduire le courant I_z et la tension U_r .
- 2- Pour $E = 15 \text{ V}$ puis pour $E = 20 \text{ V}$:
 - a. Déterminer l'état de la diode D_z .
 - b. Déduire la tension U_r et le courant I_z .



2ème PARTIE : Diode Zéner idéale

Répondre aux mêmes questions.

III - LA DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE OU LED

1 - Définition

La LED est un composant optoélectronique à base de jonction PN qui lorsqu'il est traversé par un courant électrique dans le sens direct, émet un signal lumineux de diverses couleurs possibles (Rouge, Jaune, Vert, etc.).

2 - Symbole

Le symbole de la LED peut se présenter de diverses manières comme le montre la figure III.2.a.

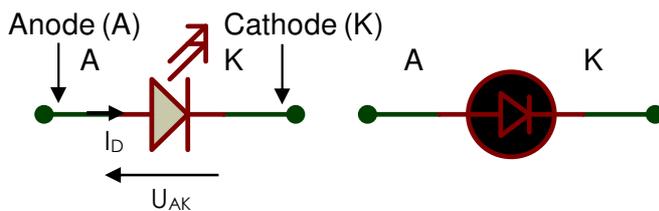


Figure III.2.a : Symboles d'une LED



Figure III.2.b : LED de diamètre 5 mm

Dans la pratique le repérage de ses bornes se fait à l'aide du méplat qui indique la cathode.

3 - Fonction

La LED est un composant qui fonctionne comme une lampe. Elle est soit allumée, soit éteinte selon la valeur du courant qui la traverse. Ainsi, on a :

- ✓ Si $I_D = 0$, $V_D = 0$ alors la LED est éteinte (LED dans un état bloqué) ;
- ✓ Si $I_D > 0$, $V_D = V_F$ alors la LED est allumée (LED dans un état passant).

Plus le courant I_D traversant la LED est élevé, plus la LED éclaire fortement.

La LED sera considérée allumée si le courant I_D est supérieur au 1/10 du courant nominal (I_F).

La LED est utilisée dans plusieurs applications telles que les voyants, les témoins, les afficheurs, les panneaux de signalisation.

4 - Caractéristiques électriques d'une LED

Le choix d'une LED se fait en fonction de son diamètre (\varnothing) et de sa couleur. Pour chaque diamètre correspond une tension de polarisation directe (V_F) et un courant nominal de polarisation directe (I_F).

$\varnothing(3\text{mm})$: $V_F = 1 \text{ V}$, $I_F = 10 \text{ mA}$;

$\varnothing(5\text{mm})$: $V_F = 2 \text{ V}$, $I_F = 20 \text{ mA}$;

$\varnothing(8\text{mm})$: $V_F = 2 \text{ V}$, $I_F = 30 \text{ mA}$.

En polarisation inverse la LED ne supporte pas plus de 5V.

Exercice d'application III.1

Soit un circuit électronique constitué d'une résistance R en série avec une LED D . L'ensemble est alimenté par une pile E .

Sachant que la LED D a un diamètre $\varnothing = 5 \text{ mm}$ et que $E = 12 \text{ V}$, déterminer la valeur de la résistance R permettant de polariser correctement la LED.

CHAPITRE IV : LE TRANSISTOR BIPOLAIRE

Objectifs du cours :

- Etre capable de définir un transistor bipolaire ;
- Etre capable d'identifier sur un schéma électronique et dans un circuit réel un transistor ;
- Connaître les fonctions que peuvent réaliser un transistor dans un montage ;
- Connaître les caractéristiques électriques d'un transistor ;
- Etre capable d'analyser un montage à base de transistor.

Prérequis : Les semi-conducteurs

Durée du cours : 3 Heures

I - PRESENTATION DU TRANSISTOR BIPOLAIRE

1 - Définition

Le transistor bipolaire est un composant électronique conçu à partir de l'association de deux (02) jonctions PN montées en sens inverse. Suivant l'orientation de ces deux jonctions, on obtient deux types de transistors :

- ✓ Les transistors PNP ;
- ✓ Les transistors NPN.

2 - Symboles

La figure I.2.a ci-dessous présente le symbole électrique des deux types de transistors bipolaires.

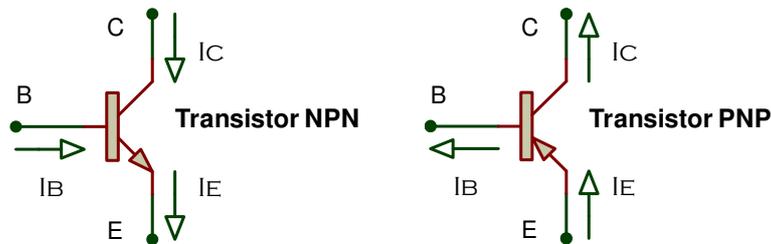


Figure I.2.a : Symbole électrique d'un transistor bipolaire

Le transistor possède trois (03) bornes :

- ✓ L'émetteur (E) ;
- ✓ La base (B) ;
- ✓ Le collecteur (C).

Sur chaque symbole du transistor, une flèche est portée par l'émetteur. Cette flèche indique non seulement le sens passant de la jonction base-émetteur mais elle permet également d'identifier le type du transistor.

Dans la réalité, le transistor bipolaire se présente sous diverses formes comme le montre la figure I.2.b.



Figure I.2.b : Transistors bipolaires

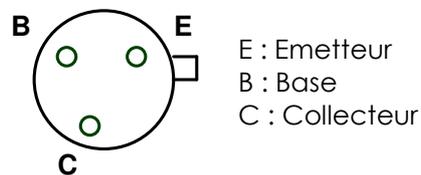


Figure I.2.c : Brochage d'un transistor métallique

Le brochage du transistor est spécifié dans la documentation technique de chaque composant. Cependant, il est possible de trouver un repère sur le composant afin d'identifier ses bornes. Pour les petits transistors métalliques par exemple, un ergot est placé du côté de l'émetteur comme l'illustre la figure I.2.c.

Pour la suite du cours, sauf indication contraire, nous utiliserons un transistor de type NPN.

3 - Fonctions

Le transistor bipolaire est un composant électronique commandé à partir de son courant de base I_B lui permettant ainsi de réaliser deux grandes fonctions : la commutation et l'amplification de signal.

❖ **La commutation**

Le transistor se comporte comme un commutateur dont l'état dépend du courant de commande I_{BQ} .

- Si $I_{BQ} = 0$ ou $V_{BEQ} < V_{BE\ Seuil}$, le transistor est dans un état bloqué

Alors $I_{CQ} = 0$ mA (Interrupteur ouvert) et $I_{EQ} = 0$ mA.

Par défaut, on prendra $V_{BE\ Seuil} = 0,6$ V

- Si $I_{BQ} > \frac{I_{CQ}}{\beta_{Min}} = I_{B\ Min\ Sat}$ ou $V_{BEQ} = V_{BE\ Sat}$, le transistor est dans un état saturé

Alors $V_{CEQ} = V_{CE\ Sat}$.

Par défaut, on prendra $V_{BE\ Sat} = 0,6$ V et $V_{CE\ Sat} = 0$ V (Interrupteur fermé).

❖ **L'amplification de signal**

Le transistor fonctionne comme un amplificateur de signal lorsqu'il est dans un état passant (non saturé) c'est-à-dire $0 < I_{BQ} < I_{B\ Min\ Sat}$ ou $V_{BEQ} = V_{BE\ Seuil}$.

4 - Relations entre grandeurs électriques d'un transistor

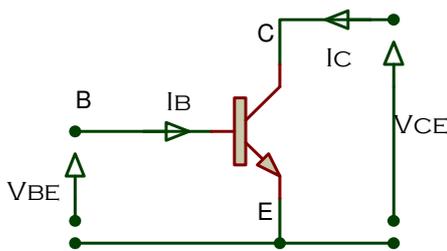


Figure I.3.a : Transistor NPN

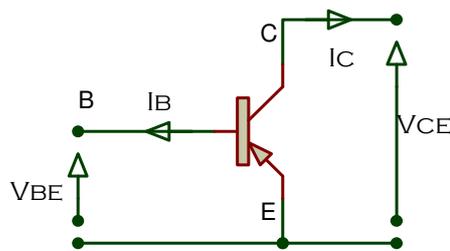


Figure I.3.b : Transistor PNP

A chaque instant : $I_E = I_B + I_C$;

En fonctionnement linéaire, $I_C = \beta \cdot I_B$ avec $\beta > 1$ (β ou h_{FE} : Coefficient d'amplification en courant).

Dans le cas d'un transistor PNP, les tensions V_{BE} et V_{CE} sont négatives.

Sauf indication contraire, on prendra pour un transistor NPN dans un état passant, $V_{BEQ} = 0,6$ V et pour un transistor PNP, $V_{BEQ} = - 0,6$ V.

II - CARACTERISTIQUES STATIQUES D'UN TRANSISTOR

Le montage ci-dessous (Figure II.a) permet de déterminer à partir d'un relevé point à point les différentes caractéristiques statiques d'un transistor.

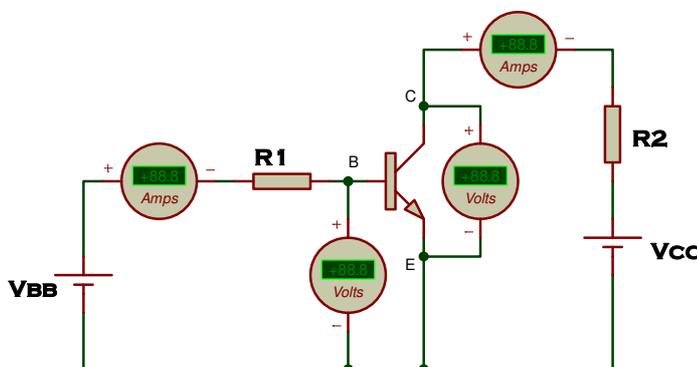
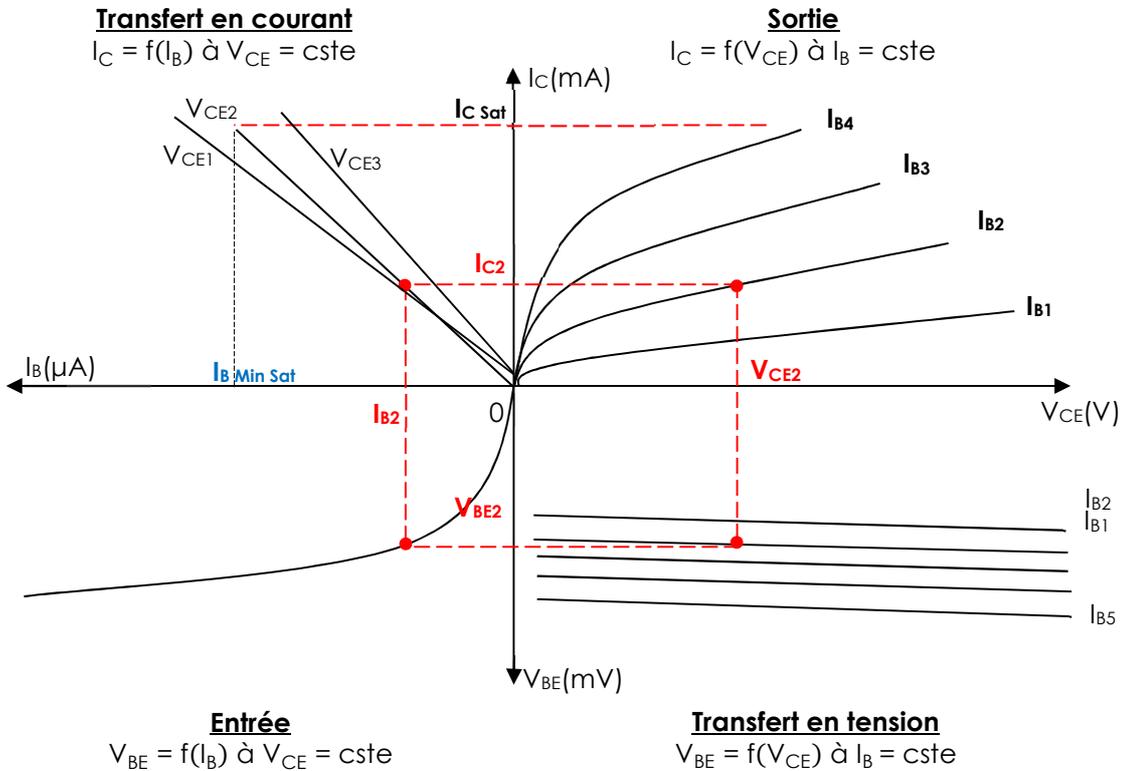


Figure II.a : Montage donnant les caractéristiques statiques d'un transistor bipolaire

On distingue quatre (04) caractéristiques statiques du transistor :

- ❖ La caractéristique d'entrée $V_{BE} = f(I_B)$ à V_{CE} constante ;
- ❖ La caractéristique de transfert en tension $V_{BE} = f(V_{CE})$ à I_B constant ;
- ❖ La caractéristique de transfert en courant $I_C = f(I_B)$ à V_{CE} constante ;
- ❖ La caractéristique de sortie $I_C = f(V_{CE})$ à I_B constant.



En observant les différentes caractéristiques statiques du transistor, on constate que :

- Pour un courant de base nulle ($I_B = 0 \mu A$), aucun courant n'arrive au collecteur : On a $I_C = 0$ mA, **le transistor est dans un état bloqué.**
- Pour un courant de base non nulle ($(0 < I_{B2} \leq I_{B\ Min\ Sat})$), un courant arrive au collecteur : $I_{C2} \neq 0$ mA, **le transistor est dans un état passant.**
- A partir d'un certain courant de base $I_B > I_{B\ Min\ Sat}$, le courant arrivant au collecteur reste constante : $I_C = I_{C\ Sat}$, **le transistor est dans un état saturé.**

Les principales caractéristiques électriques d'un transistor bipolaire sont le courant maximal du collecteur, la tension maximale entre le collecteur et l'émetteur, l'amplification en courant en continu et la puissance dissipée maximale.

❖ **Courant maximal du collecteur $I_{C\ Max}$**

Il s'agit du courant maximum du collecteur que le transistor peut accepter. Dans la conception d'un circuit, l'on prévoit une résistance pour limiter ce courant afin qu'il ne dépasse pas la valeur maximal donnée par le constructeur.

❖ **Tension de claquage collecteur-émetteur V_{CE0}**

C'est la tension maximale entre le collecteur et l'émetteur que peut supporter le transistor sans être endommagé lorsque sa base est en circuit ouvert.

❖ **Puissance dissipée maximale $P_{d\ Max}$**

Il s'agit de la dissipation maximale d'énergie au niveau du transistor qui est approximativement égale à $P_{D\ Max} \approx V_{CE} \times I_{C\ Max}$.

Si le transistor est utilisé pour la commutation, l'on peut ne pas s'en préoccuper car cette dissipation est pratiquement nulle. En revanche, si le transistor réalise la fonction d'amplificateur, l'on doit en tenir compte.

❖ **Amplification en courant h_{FE}**

C'est l'amplification en courant du transistor en fonctionnement statique. Cette caractéristique varie fortement et est comprise entre quelques dizaines et plusieurs centaines.

A température constante et pour une valeur de V_{CE} donnée, l'amplification h_{FE} évolue en fonction du courant I_C comme l'illustre la figure II.b ci-dessous. La température ambiante est un paramètre qui influence également la valeur de h_{FE} .

Dans le pire des cas, lorsque le courant du collecteur et la température varient fortement, l'amplification en courant h_{FE} varie de 1 à 9 fois.

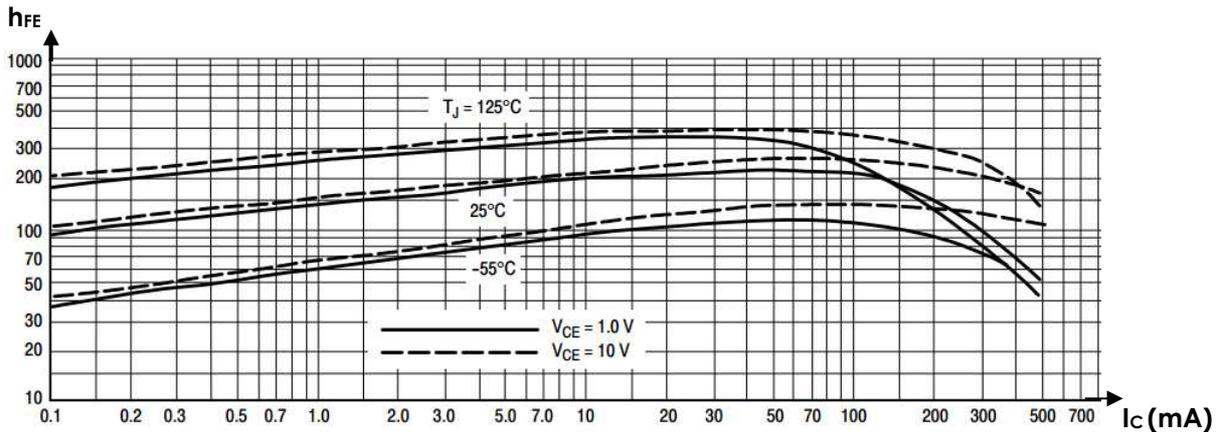


Figure II.b : Variation de h_{FE} en fonction de I_C à V_{CE} constante – cas du 2N2222

III - POLARISATION D'UN TRANSISTOR BIPOLAIRE

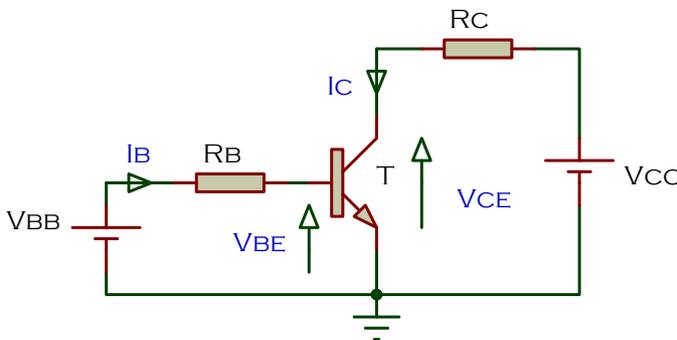
1 - Rôle de la polarisation

Pour qu'un transistor fonctionne en commutation ou en amplification dans un circuit donné, il doit obligatoirement être polarisé pour réaliser la fonction souhaitée.

La polarisation d'un transistor est un ensemble de procédés qui vise donc à fixer les tensions et les courants continus aux niveaux des jonctions base-émetteur et collecteur-émetteur.

Cette polarisation se fait en général par l'adjonction de sources de tension continues et de résistances. Ainsi, on définit un état de fonctionnement du transistor caractérisé par les quatre (04) grandeurs statiques V_{BEQ} , I_{BQ} , I_{CQ} et V_{CEQ} .

2 - Schéma de principe



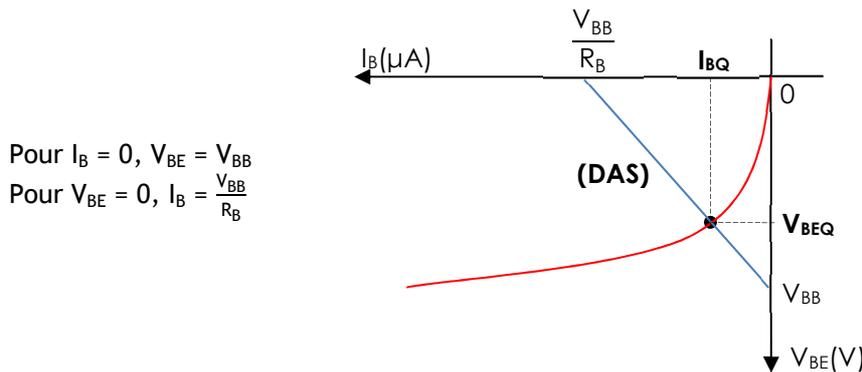
Dans la pratique, l'on utilise le plus souvent une seule source de tension pour polariser le transistor. Dans ce cas on a $V_{BB} = V_{CC}$.

3 - Point de fonctionnement

La détermination des quatre (04) grandeurs statiques V_{BEQ} , I_{BQ} , I_{CQ} et V_{CEQ} nécessite un système de quatre équations.

- Deux équations d'entrée liant I_B et V_{BE}
 - $V_{BE} = f(I_B)$ à $V_{CE} = cste$: La caractéristique d'entrée.
 - $V_{BE} = f(I_B)$: La loi des mailles appliquée au circuit d'entrée.

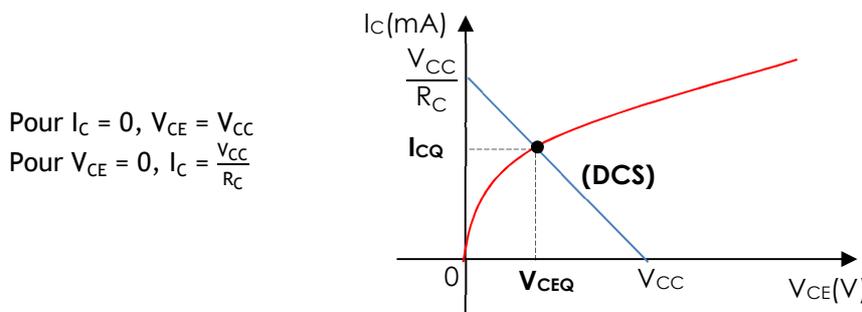
La droite dont l'équation est obtenue à partir du circuit d'entrée est appelée droite d'attaque statique (DAS). On a : $V_{BE} + R_B I_B = V_{BB}$ (DAS).



L'intersection de la droite d'attaque statique (DAS) avec la caractéristique d'entrée permet de déterminer V_{BEQ} et I_{BQ} , coordonnées du point de fonctionnement du circuit d'entrée.

- Deux relations de sortie entre I_C et V_{CE}
 - $I_C = f(V_{CE})$ à $I_B = cste$: La caractéristique de sortie.
 - $I_C = f(V_{CE})$: La loi des mailles appliquée au circuit de sortie.

La droite dont l'équation est obtenue à partir du circuit de sortie est appelée droite de charge statique (DCS). On a : $V_{CE} + R_C I_C = V_{CC}$ (DCS).



L'intersection de la droite de charge statique (DCS) avec la caractéristique de sortie permet de déterminer V_{CEQ} et I_{CQ} , coordonnées du point de fonctionnement du circuit de sortie.

4 - Types de polarisation

Il existe différents types de polarisation du transistor :

- ✓ La polarisation par réaction de base ;
- ✓ La polarisation par réaction d'émetteur ;
- ✓ La polarisation par réaction du collecteur ;
- ✓ La polarisation par pont de base.

4-1- Polarisation par réaction de base

❖ Schéma de principe

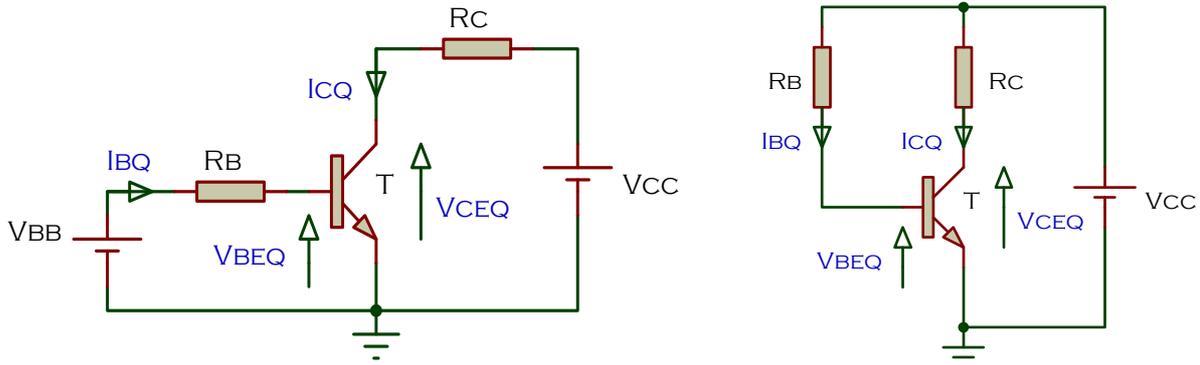


Figure III.4.1.a : Polarisation par réaction de base

❖ Analyse de la polarisation

Circuit d'entrée : $V_{BEQ} + R_B I_{BQ} = V_{BB}$ alors $I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_B}$

Circuit de sortie : $V_{CEQ} + R_C I_{CQ} = V_{CC}$ alors $I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{R_C}$

En fonctionnement linéaire, on a : $I_{CQ} = h_{FE} \cdot I_{BQ}$

$$I_{CQ} = h_{FE} \cdot \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_B}$$

D'après cette relation, on remarque qu'une variation de l'amplification en courant h_{FE} entraîne également une variation de même ordre du courant I_{CQ} . Il n'y a aucune possibilité de surmonter cette variation de h_{FE} . Le transistor est dans un état de saturation si $I_{C\text{ Sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C}$.

Exemple :

$R_B = 68 \text{ K}\Omega$; $R_C = 1 \text{ K}\Omega$; $T = (2N2222 ; h_{FE} = 100)$; $V_{BB} = 5 \text{ V}$ et $V_{CC} = 10 \text{ V}$

On a : $I_{C\text{ Sat}} = 10 \text{ mA}$

Pour $h_{FE} = 100$, $I_{CQ} = 6,47 \text{ mA}$

Pour $h_{FE} = 160$, $I_{CQ} = 10,35 \text{ mA} > I_{C\text{ Sat}}$. Le transistor est alors saturé et on a $V_{CEQ} = V_{CE\text{ Sat}}$, $I_{CQ} = I_{C\text{ Sat}}$.

Ce type de polarisation ne sera jamais utilisé dans les circuits linéaires car il ne permet pas de stabiliser le point de fonctionnement du transistor. C'est le type de polarisation idéal pour les circuits dans lesquels le transistor commute entre le blocage et la saturation.

4-2- Polarisation par réaction de l'émetteur

❖ Schéma de principe

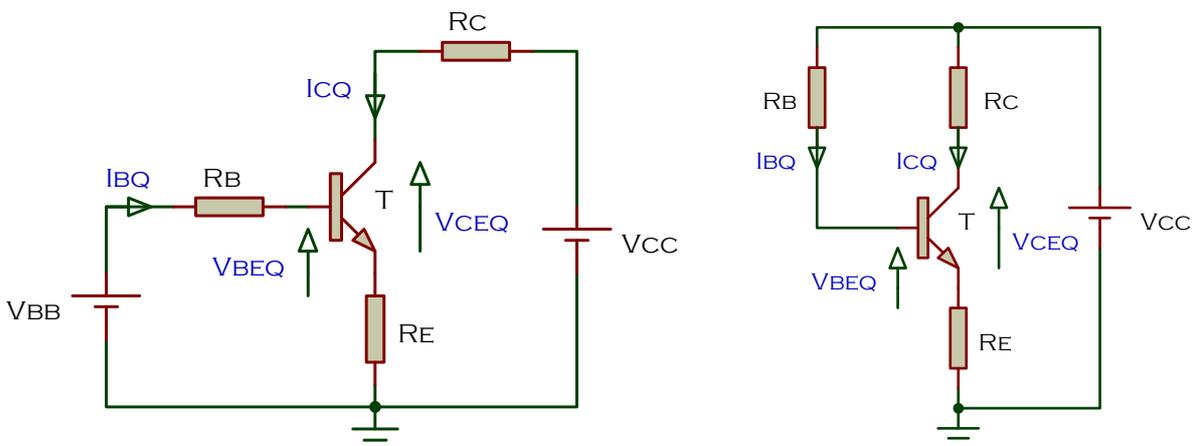


Figure III.2.a : Polarisation par réaction de l'émetteur

❖ Analyse de la polarisation

Circuit d'entrée : $V_{BEQ} + [R_B + (1+h_{FE}) \cdot R_E] I_{BQ} = V_{BB}$ alors $I_{BQ} = \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_B + (1+h_{FE}) R_E} \approx \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_B + h_{FE} R_E}$
 Circuit de sortie : $V_{CEQ} + [R_C + (1+\frac{1}{h_{FE}}) \cdot R_E] I_{CQ} = V_{CC}$ alors $I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{R_C + (1 + \frac{1}{h_{FE}}) R_E} \approx \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{R_C + R_E}$

En fonctionnement linéaire, on a : $I_{CQ} = h_{FE} \cdot I_{BQ}$

$$I_{CQ} \approx \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_E + \frac{R_B}{h_{FE}}}$$

D'après cette relation, on remarque qu'une variation de l'amplification en courant h_{FE} entraîne une variation plus ou moins importante du courant I_{CQ} . Mais la résistance R_E , si elle est très grande devant $\frac{R_B}{h_{FE}}$, permet de contrebalancer l'effet de la variation de h_{FE} . En effet, on pourrait alors écrire $I_{CQ} \approx \frac{V_{BB} - V_{BEQ}}{R_E}$.

Au vue de cette relation, le courant I_{CQ} reste constant quel que soit la variation de h_{FE} .

En contrepartie, plus la valeur de la résistance R_E est élevée plus la saturation du transistor est très vite atteinte. On a : $I_{C\text{ Sat}} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$.

Exemple :

$R_B = 68 \text{ K}\Omega$; $R_C = 1 \text{ K}\Omega$; $R_E = 2,7 \text{ K}\Omega$; $T = (2N2222 ; h_{FE} = 100)$; $V_{BB} = V_{CC} = 5 \text{ V}$

On a : $I_{C\text{ sat}} = 1,35 \text{ mA}$

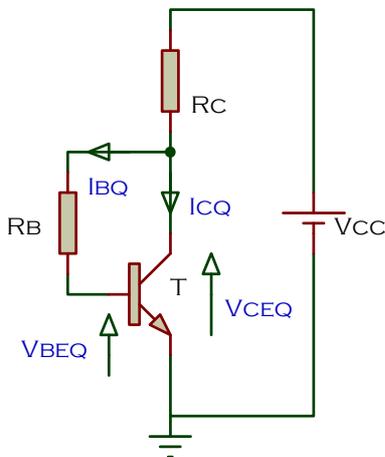
Pour $h_{FE} = 100$, $I_{CQ} = 1,30 \text{ mA}$

Pour $h_{FE} = 200$, $I_{CQ} = 1,45 \text{ mA} > I_{C\text{ sat}}$. Le transistor est alors saturé et on a $V_{CEQ} = V_{CE\text{ sat}}$, $I_{CQ} = I_{C\text{ sat}}$.

L'introduction d'une résistance $R_E \gg \frac{R_B}{h_{FE}}$ au niveau de l'émetteur du transistor, bien qu'elle permet de minimiser l'effet de la variation de h_{FE} , occasionne une saturation beaucoup plus rapide du transistor. Ce type de polarisation est plutôt employé pour réaliser la commutation.

4-3- Polarisation par réaction du collecteur

❖ Schéma de principe



❖ Analyse de la polarisation

Circuit d'entrée : $V_{BEQ} + [R_B + (1+h_{FE}) \cdot R_C] I_{BQ} = V_{CC}$ alors $I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_B + (1+h_{FE}) R_C} \approx \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_B + h_{FE} R_C}$
 Circuit de sortie : $V_{CEQ} + (1+\frac{1}{h_{FE}}) \cdot R_C I_{CQ} = V_{CC}$ alors $I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{(1 + \frac{1}{h_{FE}}) R_C} \approx \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{R_C}$

En fonctionnement linéaire, on a : $I_{CQ} = h_{FE} \cdot I_{BQ}$

$$I_{CQ} \approx \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_C + \frac{R_B}{h_{FE}}}$$

D'après cette relation, on remarque qu'une variation de l'amplification en courant h_{FE} entraîne une variation plus ou moins importante du courant I_{CQ} . Mais la résistance R_C , si elle est très grande devant $\frac{R_B}{h_{FE}}$, permet de contrebalancer l'effet de la variation de h_{FE} .

En effet, on pourrait alors écrire $I_{CQ} \approx \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_C}$.

Au vue de cette relation, le courant I_{CQ} reste constant quel que soit la variation de h_{FE} . Bien vrai que le courant de saturation $I_{C\ sat}$ du transistor diminue avec l'augmentation de R_C , le transistor ne pourra en aucun cas être saturé. On aura toujours $I_{C\ sat} = \frac{V_{CC}}{R_C} > I_{CQ} \approx \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_C}$.

Exemple :

$R_B = 4,7\ K\Omega$; $R_C = 3,3\ K\Omega$; $T = (2N2222 ; h_{FE} = 100)$; $V_{CC} = 15\ V$

On a : $I_{C\ sat} = 4,55\ mA$

Pour $h_{FE} = 100$, $I_{CQ} = 4,30\ mA$

Pour $h_{FE} = 1000$, $I_{CQ} = 4,36\ mA < I_{C\ sat}$. Le transistor est alors passant (non saturé).

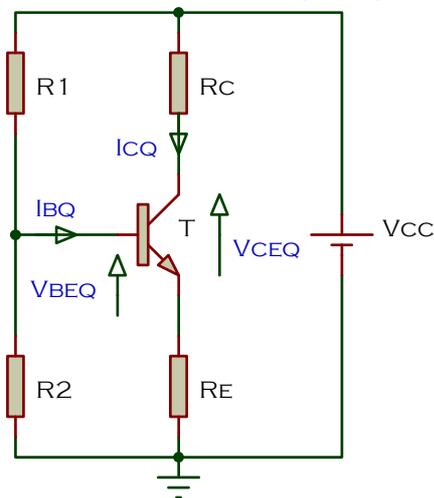
Le choix d'une valeur de la résistance $R_C \gg \frac{R_B}{h_{FE}}$ permet de minimiser l'effet de la variation de h_{FE} sans atteindre la saturation du transistor. Ce type de polarisation est encore utilisé dans les circuits linéaires.

Directive de conception :

Régler le point de repos près du point milieu de la droite de charge statique. Pour obtenir un tel résultat, il suffit de respecter l'égalité $R_B = h_{FE} R_C$.

4-4- Polarisation par pont de base

❖ Schéma de principe



On donne :

$R_1 = 150\ K\Omega$

$R_2 = 27\ K\Omega$

$R_C = 4,7\ K\Omega$

$R_E = 1,2\ K\Omega$

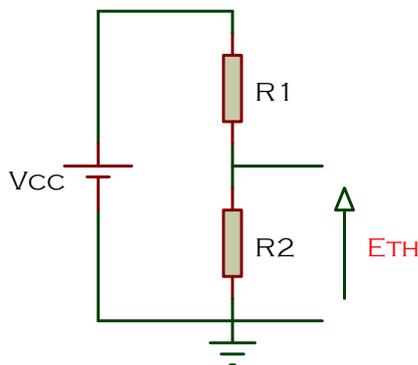
$V_{CC} = 12\ V$ $h_{FE} = 160$

Figure III.4.a : Polarisation par pont de base

❖ Simplification du schéma par le théorème de Thévenin

a. Schéma équivalent de Thévenin entre la base et la masse.

Détermination de E_{TH}

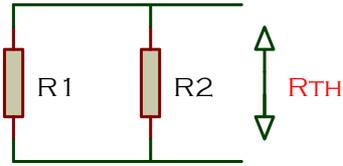


Par diviseur de tension

$$E_{TH} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC}$$

$$E_{TH} = 1,83\ V$$

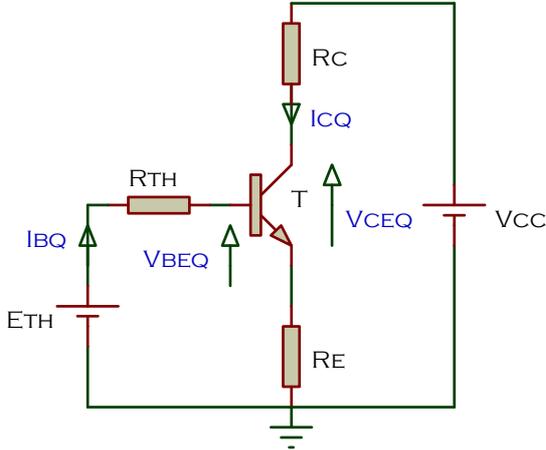
Détermination de R_{TH}



$$R_{TH} = (R_1 // R_2)$$

$$R_{TH} = 22,88 \text{ K}\Omega$$

Schéma équivalent du montage



❖ Analyse de la polarisation

Circuit d'entrée : $V_{BEQ} + [R_{TH} + (1 + h_{FE}) R_E] I_{BQ} = E_{TH}$ alors $I_{BQ} = \frac{E_{TH} - V_{BEQ}}{R_{TH} + (1 + h_{FE}) R_E} \approx \frac{E_{TH} - V_{BEQ}}{R_{TH} + h_{FE} R_E}$

Circuit de sortie : $V_{CEQ} + [R_C + (1 + \frac{1}{h_{FE}}) R_E] I_{CQ} = V_{CC}$ alors $I_{CQ} = \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{R_C + (1 + \frac{1}{h_{FE}}) R_E} \approx \frac{V_{CC} - V_{CEQ}}{R_C + R_E}$

En fonctionnement linéaire, on a : $I_{CQ} = h_{FE} \cdot I_{BQ}$

$$I_{CQ} \approx \frac{E_{TH} - V_{BEQ}}{R_E + \frac{R_{TH}}{h_{FE}}}$$

D'après cette relation, on remarque qu'une variation de l'amplification en courant h_{FE} entraîne une variation plus ou moins importante du courant I_{CQ} . Mais la résistance R_E , si elle est très grande devant $\frac{R_{TH}}{h_{FE}}$, permet de contrebalancer l'effet de la variation de h_{FE} .

En effet, on pourrait alors écrire $I_{CQ} \approx \frac{E_{TH} - V_{BEQ}}{R_E}$.

Au vue de cette relation, le courant I_{CQ} reste insensible à la variation de h_{FE} et le point de fonctionnement est pratiquement stable.

Exemple :

$R_1 = 150 \text{ K}\Omega$; $R_2 = 27 \text{ K}\Omega$; $R_C = 4,7 \text{ K}\Omega$; $R_E = 1,2 \text{ K}\Omega$; $T = (2N2222$; $h_{FE} = 160)$; $V_{CC} = 12 \text{ V}$

On a : $I_{C \text{ sat}} = 2,03 \text{ mA}$

Pour $h_{FE} = 160$, $I_{CQ} = 0,92 \text{ mA}$

Pour $h_{FE} = 1000$, $I_{CQ} = 1,01 \text{ mA} < I_{C \text{ sat}}$. Le transistor est alors passant

Le choix d'une résistance $R_E \gg \frac{R_{TH}}{h_{FE}}$ au niveau de l'émetteur du transistor permet d'éliminer l'effet de la variation de h_{FE} et donc de stabiliser le point de repos du transistor. C'est le type de polarisation de premier choix dans les circuits linéaires.

Directive de conception :

❖ **Diviseur de tension soutenu**

Pour stabiliser le point de fonctionnement du transistor, il suffit de choisir la résistance $R_E \gg \frac{R_{TH}}{h_{FE}}$
 La règle de 1/100 permet d'écrire : $R_{TH} \leq 0,01 h_{FE} R_E$. Habituellement $R_2 < R_1$ alors $R_2 \leq 0,01 h_{FE} R_E$

❖ **Règle de 1/10**

Cette règle convient pour la plupart des circuits mais il faut se rappeler qu'elle n'est qu'une directive. Certains concepteurs ne l'utilisent pas.

La règle de 1/10 permet d'écrire : $V_{EM} = 0,1 V_{CC}$

Si on positionne le point de repos du transistor à peu près au milieu de la droite de charge statique, une tension d'environ 0,5 V_{CC} apparaît entre les bornes collecteur-émetteur du transistor. C'est-à-dire $V_{CEQ} = 0,5 V_{CC}$.

Aux bornes de la résistance de collecteur on a environ une tension de 0,4 V_{CC} d'où $R_C = 4 R_E$.

Connaissant h_{FE} et I_{CQ} , en prenant $I_1 = 11 I_{BQ}$ et $I_2 = 10 I_{BQ}$, on détermine aisément R_1 et R_2 .

De manière générale, pour concevoir un dispositif électronique utilisant un transistor il est impératif de répondre à un certain nombre de questions :

- Quelle fonction réalisera le transistor dans le circuit ?
- Quelle sera le courant maximal $I_{CQ_{Max}}$ au collecteur le transistor ?
- De quel gain en courant aurez-vous besoin pour amplifier le signal d'entrée ?
- Quelle quantité d'énergie (quelle puissance) pourra être dissipée par le transistor dans les conditions extrêmes de fonctionnement (par exemple si le transistor est bloqué et si toute la tension d'alimentation doit être absorbée par la liaison collecteur-émetteur)?

IV - MÉTHODOLOGIE DE DÉTERMINATION DE L'ÉTAT D'UN TRANSISTOR

Pour déterminer l'état d'un transistor, l'on peut procéder comme suit :

1 - Faire une hypothèse sur l'état du transistor

- Transistor dans un état bloqué : $I_{BQ} = 0 \mu A$
- Transistor dans un état passant : $V_{BEQ} = V_{BE_{Seuil}}$
- Transistor dans un état saturé : $V_{BEQ} = V_{BE_{Sat}}$

2 - Vérifier l'inégalité définissant l'état du transistor

- $V_{BEQ} < V_{BE_{Seuil}}$ si le transistor est dans un état bloqué
- $0 < I_{BQ} < I_{B_{Min Sat}}$ si le transistor est dans un état passant
- $I_{BQ} > \frac{I_{CQ}}{\beta_{Min}}$ si le transistor est dans un état saturé

3 - Conclure par rapport à l'hypothèse

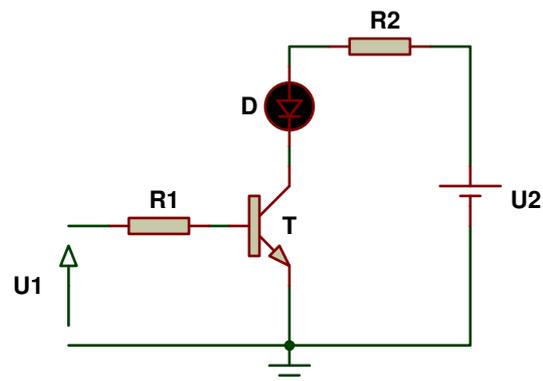
Exercice d'application IV.1 :

On considère le circuit électronique ci-dessous.

On souhaite commander l'allumage de la LED D à partir de la tension U_1 .

On donne : $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 560 \Omega$; D (Verte, $\Phi = 5 \text{ mm}$) ; $U_2 = 12 \text{ V}$ et T (2N2222A ; $\beta_{Min} = 100$; $V_{BE_{Seuil}} = 0,6 \text{ V}$; $V_{BE_{Sat}} = 0,7 \text{ V}$; $V_{CE_{Sat}} = 0,1 \text{ V}$).

- 1 - Pour $U_1 = 500 \text{ mV}$:
 - 1-1- Montrer que T est bloqué.
 - 1-2- Quel est l'état de D ? Justifier votre réponse.
- 2 - Pour $U_1 = 5 \text{ V}$:
 - 2-1- Montrer que T est saturé.
 - 2-2- Quel est l'état de la LED D ? Justifier votre réponse.
- 3 - Quel rôle joue le transistor dans ce circuit ?



V - LE TRANSISTOR BIPOLAIRE EN REGIME DYNAMIQUE

La plupart des circuits électriques ont une entrée constituée de 2 fils et une sortie constituée également de 2 fils. L'ensemble constitue un quadripôle.

En régime dynamique, le transistor peut être considéré comme un quadripôle dont le schéma se présente comme suit :

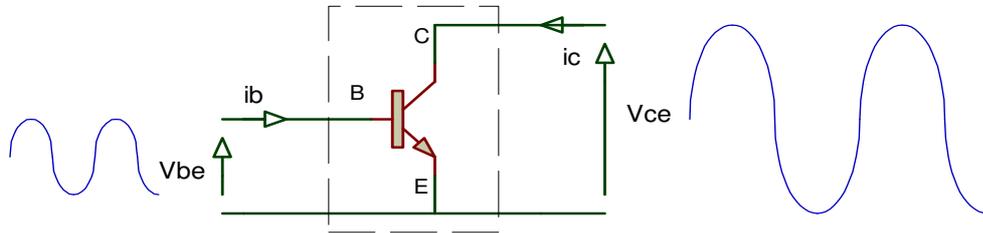


Figure V.a Transistor monté en émetteur commun

L'application d'un signal variable à l'entrée du transistor engendre au niveau du transistor une superposition de grandeurs continues et statiques (V_{BEQ} , I_{BQ} , I_{CQ} et V_{CEQ}) et de grandeurs alternatives (v_{be} , i_b , i_c et v_{ce}).

1 - Paramètres hybrides (H) du transistor

Les paramètres H d'un transistor sont obtenus en exprimant la tension v_{be} et le courant i_c en fonction du courant i_b et de la tension v_{ce} .

❖ **Equations en signaux variables**

On a :

$$\begin{cases} v_{be} = h_{ie} \cdot i_b + h_{re} \cdot v_{ce} \\ i_c = h_{fe} \cdot i_b + h_{oe} \cdot v_{ce} \end{cases}$$

❖ **Paramètres hybrides du transistor**

$h_{ie} (\Omega) = \left. \frac{v_{be}}{i_b} \right|_{v_{ce}=0}$ (Résistance d'entrée)

$h_{re} = \left. \frac{v_{be}}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$ (Réaction tension d'entrée sur la tension de sortie)

$h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{v_{ce}=0}$ (Coefficient direct)

$h_{oe} (S) = \left. \frac{i_c}{v_{ce}} \right|_{i_b=0}$ (Admittance de sortie)

2 - Schéma équivalent du transistor en régime dynamique

Schéma équivalent petits signaux (émetteur commun)

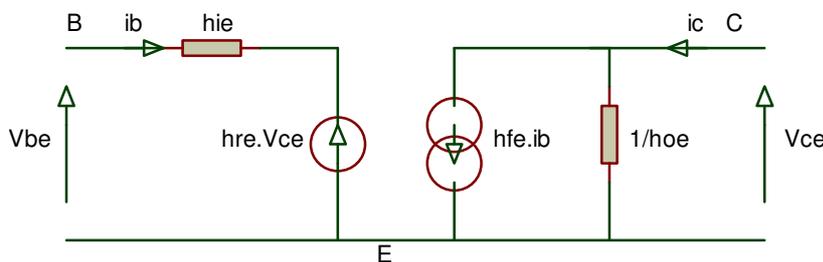
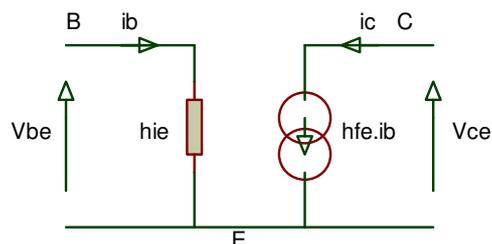


Schéma équivalent simplifié (idéal)

$h_{oe} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{1}{h_{oe}} \rightarrow \infty$

$h_{re} \rightarrow 0$



3 - Montages de base d'un transistor

Transistor monté en émetteur commun (e.c)

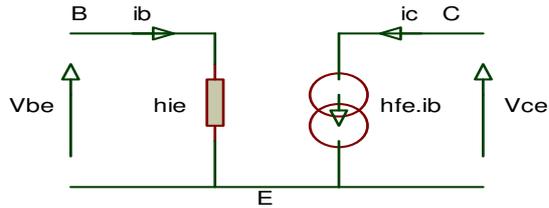
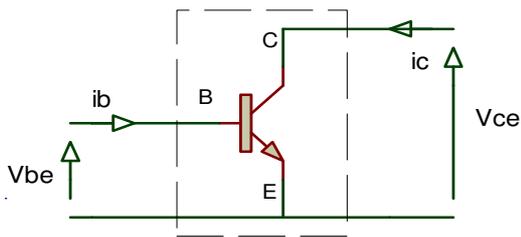


Schéma équivalent simplifié

Transistor monté en base commune (b.c)

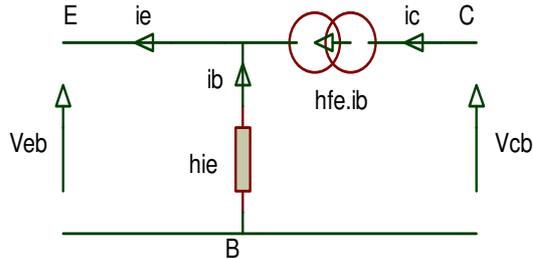
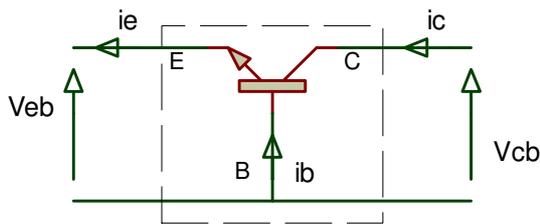


Schéma équivalent simplifié avec les paramètres e.c

Transistor monté en collecteur commun (c.c)

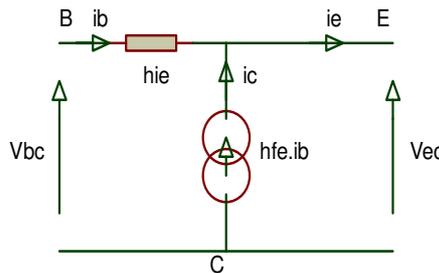
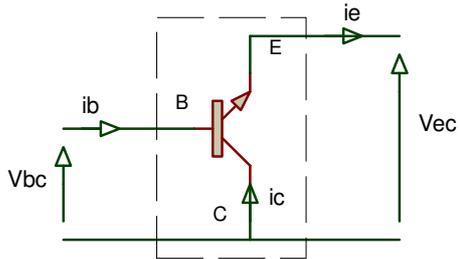
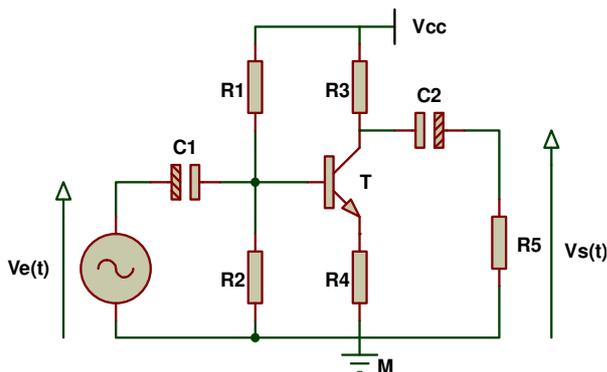


Schéma équivalent simplifié avec les paramètres e.c

Exercice d'application V.1 :

Soit le montage préamplificateur à transistor ci-dessous.



On donne :

$R_1 = 33 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 5,6 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 820 \text{ }\Omega$, $R_4 = 220 \text{ }\Omega$, $V_{cc} = 20 \text{ V}$ et $h_{FE} = 200$.

1 - Fonctionnement statique

1-1- Donner le schéma équivalent du montage en régime statique.

1-2- Déterminer les équations des droites d'attaque statique et de charge statique.

1-3- Calculer les coordonnées du point de repos V_{BEQ} , I_{BQ} , I_{CQ} et V_{CEQ} .

2 - Fonctionnement dynamique

2-1- Donner le schéma équivalent simplifié du transistor seul.

2-2- Donner le schéma équivalent du montage.

On rappelle qu'en régime statique toutes les sources autonomes variables sont éteintes et les condensateurs se comportent comme des circuits ouverts. Par contre, en régime dynamique toutes les sources autonomes continues sont éteintes et les condensateurs se comportent comme des circuits fermés.

CHAPITRE V : LE TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP

Objectifs du cours :

- Etre capable de définir un transistor à effet de champ (FET) ;
- Etre capable d'identifier sur un schéma électronique et dans un circuit réel un FET ;
- Connaître les fonctions que peuvent réaliser un FET dans un montage ;
- Connaître les caractéristiques électriques d'un FET ;
- Etre capable d'analyser un montage à base de FET.

Prérequis :

- La théorie des semi-conducteurs

Durée du cours : 3 Heures

On distingue deux (02) familles de transistors à effet de champ :

- Les transistors à effet de champ à jonction ou JFET (Junction Field Effect Transistor) ;
- Les transistors à effet de champ à métal oxyde semi-conducteur ou MOSFET (Metal Oxyde semiconductor Field Effect Transistor).

I - TRANSISTOR A EFFET DE CHAMP A JONCTION OU JFET

1 - Présentation d'un JFET

1-1- Principe de fonctionnement

Considérons un barreau cylindrique de semi-conducteur dopé de type N dans lequel on insère deux (02) zones dopées de type P.

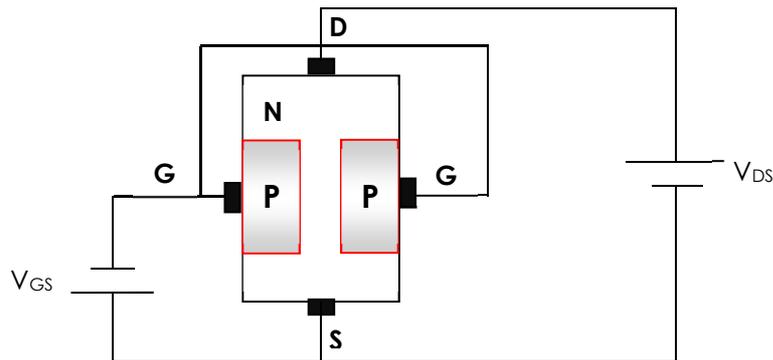


Figure I.1.1.a : Schéma de principe d'un JFET canal N

- Le petit espace entre les deux régions P constitue le canal. La largeur du canal détermine le courant qui traverse le JFET.
- L'extrémité de la région P constitue la Grille (G). c'est l'électrode à partir de laquelle on peut contrôler la largeur du canal.
- La région N possède deux (02) extrémités. L'extrémité par laquelle les porteurs de charges (les électrons) entrent dans le canal correspond à la Source (S). Celle par laquelle les porteurs de charges quittent dans le canal est le Drain (D).

Pour V_{GS} nulle et sous l'action de la tension drain-source V_{DS} , un courant drain I_D circule dans le canal. La largeur du canal diminue quand on se rapproche du drain.

Plus V_{GS} diminue, plus la largeur du canal se rétrécit suite à l'introduction de charges positives dans le canal et donc à des recombinaisons : la population en électrons diminue et la conduction du canal diminue.

Lorsque V_{GS} devient inférieure ou égale à un certain seuil $V_{GS\ off}$, le canal est complètement refermé et le courant drain devient nul.

Selon la valeur de la tension grille-source V_{GS} , le canal est plus ou moins conducteur. La tension grille commande la largeur du canal.

1-2- Définition

Le JFET est un composant électronique conçu à partir d'une jonction PN dont le fonctionnement dépend du déplacement d'un seul type de charge, les trous ou les électrons. C'est donc un transistor unipolaire. Suivant le type de charge qui se déplace, on obtient deux types de JFET :

- ✓ Les JFET canal N : déplacement des électrons ;
- ✓ Les JFET canal P : déplacement des trous.

1-3- Symboles d'un JFET

La figure I.1.3.a ci-dessous présente le symbole électrique des deux types de JFET.

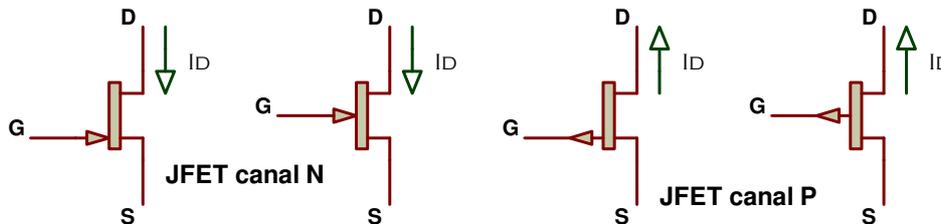


Figure I.1.3.a : Symbole électrique d'un JFET

Le JFET est doté de trois (03) bornes : la grille (G), le drain (D) et la source (S). Sur chaque symbole, une flèche est portée par la grille (G). Cette flèche indique non seulement le sens passant de la jonction grille-source mais elle permet également d'identifier le type du transistor. Elle est parfois décalée du côté de la source.

Les JFET sont pratiquement identiques aux transistors bipolaires dans la forme et leurs brochages sont spécifiés dans la documentation technique de chaque composant.

Pour le JFET canal N, la tension V_{DS} est positive et la tension V_{GS} négative.

Pour le JFET canal P, la tension V_{DS} est négative et la tension V_{GS} positive.

Pour la suite du cours, sauf indication contraire, nous utiliserons un JFET canal N.

2 - Fonctions d'un JFET

Le JFET est un composant électronique commandé à partir de sa tension grille-source V_{GS} lui permettant ainsi de réaliser deux grandes fonctions : la commutation et l'amplification de signal.

Remarque : Le courant de Grille I_G est quasiment nul ($I_G = 0 \text{ mA}$).

❖ La commutation

Le JFET se comporte comme un commutateur dont l'état dépend de la tension de commande V_{GS} .

- Si $V_{GS} \leq V_C$, le JFET est dans un état bloqué

Alors $I_D = I_S = 0 \text{ mA}$ (Interrupteur ouvert).

Par défaut, on prendra $V_C = V_{GS \text{ off}} = -5 \text{ V}$.

V_C : Tension de blocage ou tension de pincement par V_{GS} .

- Si $V_C < V_{GS} \leq 0$ et $0 \leq V_{DS} \leq V_P$, le JFET est dans un état saturé

Alors $V_{DS} = V_{DS \text{ Sat}}$ et $I_D \neq 0 \text{ mA}$

Par défaut, on prendra $V_P = 5 \text{ V}$ et $V_{DS \text{ Sat}} = 0 \text{ V}$ (Interrupteur fermé).

V_P : Tension de pincement par V_{DS} .

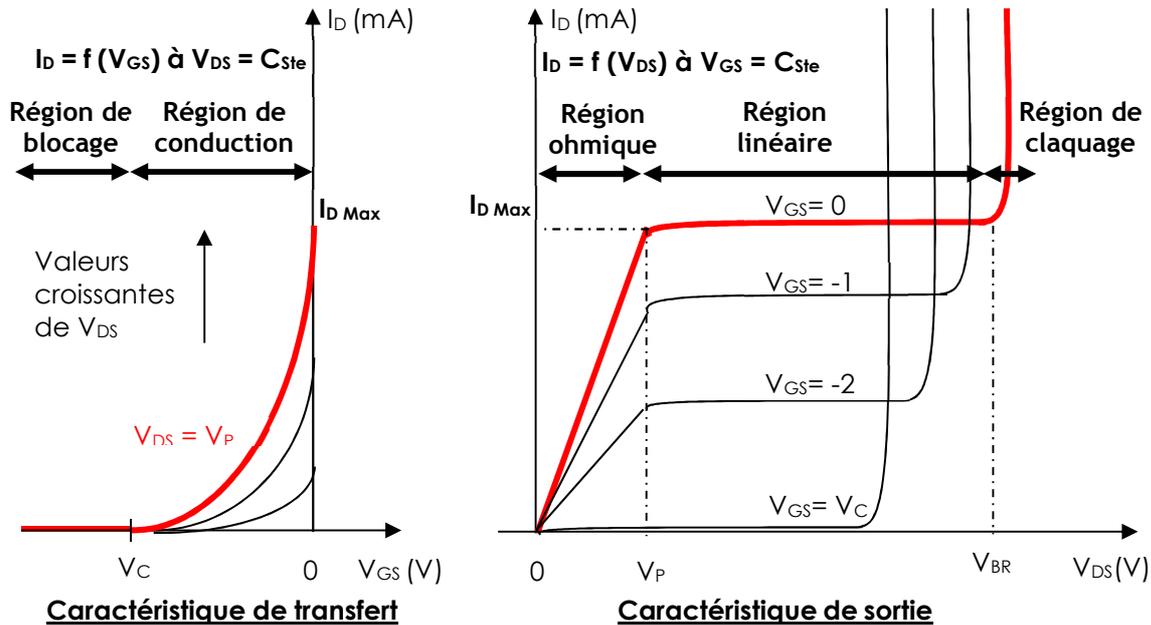
❖ L'amplification de signal

Le JFET fonctionne comme un amplificateur de signal lorsqu'il est dans un état passant (non saturé) c'est-à-dire $V_C < V_{GS} \leq 0$ et $V_{DS} > V_P$.

Alors $I_D = I_{D \text{ Max}} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_C}\right)^2$ où $I_{D \text{ Max}}$ est le courant maximum de drain.

3 - Caractéristiques statiques d'un JFET

Les caractéristiques statiques d'un JFET canal N se présentent comme suit :



La caractéristique de transfert d'un JFET comporte une région de blocage et une région de conduction. Quant à la caractéristique de sortie elle présente une région ohmique, une région linéaire et une région de claquage.

Le JFET est un transistor qui se comporte comme un circuit ouvert ou un conducteur selon la valeur de la tension V_{GS} entre la Grille et la Source.

Tant que la tension $V_{GS} \leq V_C$, le canal Drain-Source reste fermé. Aucun courant ne traverse le canal. Le JFET est bloqué. On dit qu'il fonctionne dans sa région de blocage.

Une fois que $V_C < V_{GS} \leq 0$, le canal Drain-Source se débloque et l'ouverture s'élargie au fur et à mesure que la tension V_{GS} se rapproche de la valeur zéro. Le canal est parcouru par un courant appelé courant de drain et note I_D . Le JFET est conducteur. On dit qu'il fonctionne dans sa région de conduction.

Lorsque le JFET est conducteur, il présente deux (02) types de comportements selon la tension de Drain-Source (V_{DS}).

Si $0 \leq V_{DS} \leq V_P$, le canal se comporte comme une résistance (R_{DS}). Le courant de Drain I_D est proportionnel à la tension V_{DS} . La valeur de cette résistance dépend toutefois de la valeur de V_{GS} . On dit que le JFET fonctionne dans sa région ohmique.

Si $V_{DS} > V_P$, le courant I_D devient quasiment constant et indépendant de V_{DS} . Les variations de I_D sont quasiment proportionnelles à celles de V_{GS} . On dit que le JFET fonctionne dans sa région linéaire.

Pour une valeur de V_{DS} donnée, le courant de drain I_D varie en fonction de la tension V_{GS} selon la loi $I_D = I_{D\text{Max}} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_C}\right)^2$ où $I_{D\text{Max}}$ est le courant maximum de drain.

Au-delà d'une certaine tension $V_{DS} = V_{BR}$ (break down voltage drain - gate ou tension de rupture), le courant I_D traversant le JFET augmente très brusquement. Dans cette région qui correspond à la région de claquage, il y a destruction du JFET.

Soit g_m la pente de la caractéristique de transfert ou la transconductance exprimée en Siemens (S).

On a $g_m = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \frac{dI_D}{dV_{GS}}$ (si la variable est petite)

$$g_m = -2 I_{D\text{Max}} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_C}\right) \frac{1}{V_C}$$

On a $g_{m0} = g_m(V_{GS} = 0)$ alors $g_{m0} = -2 \frac{I_{D\text{Max}}}{V_C}$

D'où $g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_C}\right)$ avec $g_{m0} = -2 \frac{I_{D\text{Max}}}{V_C}$

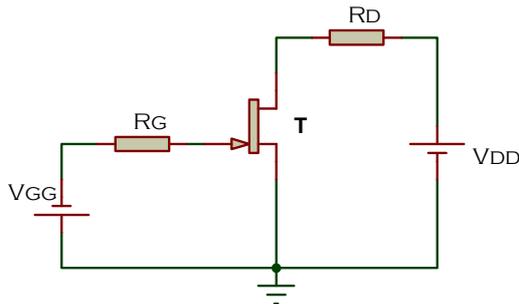
4 - Polarisation d'un JFET

- ❑ Point de fonctionnement ou point de repos du JFET : V_{GSQ} ; V_{DSQ} et I_{DQ} .
- ❑ Droite d'attaque statique (DAS) : $I_D = f(V_{GS})$
- ❑ Droite de charge statique (DCS) : $I_D = f(V_{DS})$

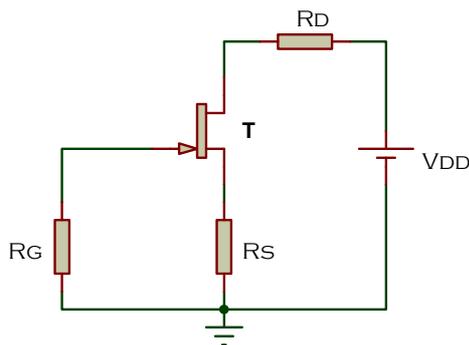
Selon le fonctionnement que l'on souhaite obtenir, il existe plusieurs types de montages permettant de polariser un JFET. Les montages classiques de polarisation d'un JFET sont :

- ✓ La polarisation de grille ;
- ✓ La polarisation automatique ;
- ✓ La polarisation par pont diviseur de tension.

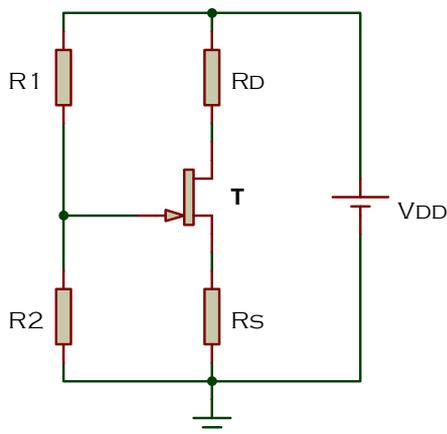
4-1- Polarisation de grille



4-2- Polarisation automatique



4-3- Polarisation par pont diviseur de tension



5 - Le JFET en régime dynamique

En régime dynamique, le JFET peut être considéré comme un quadripôle dont le schéma se présente comme suit :

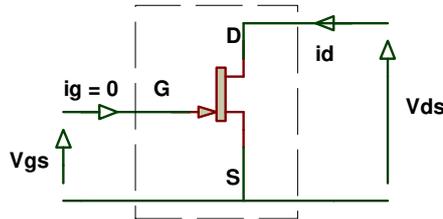
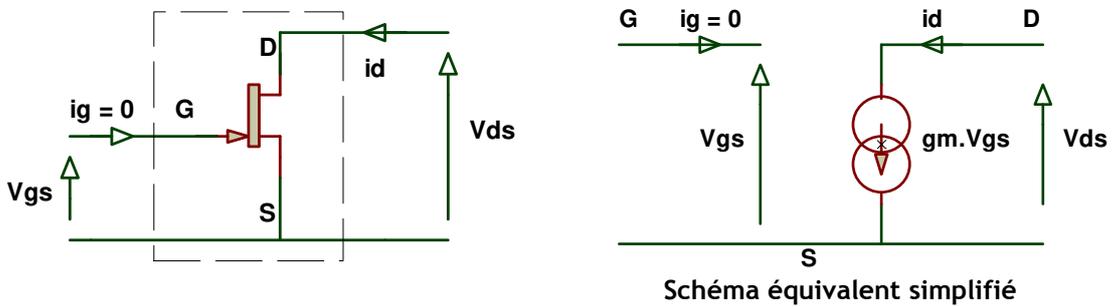


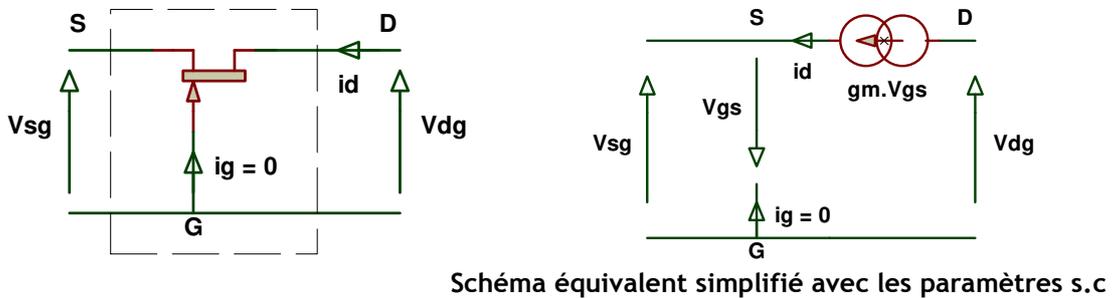
Figure IV.a JFET monté en Source commune

Selon la disposition d'un JFET dans un montage, il peut être monté en source commune, en Grille commune ou en Drain commun.

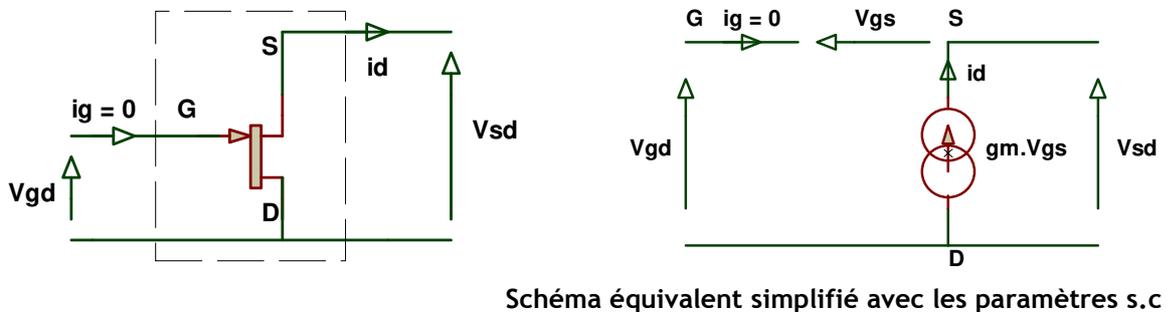
5-1- Schéma équivalent d'un JFET monté en Source commune (s.c)



5-2- Schéma équivalent d'un JFET monté en Grille commune (g.c)

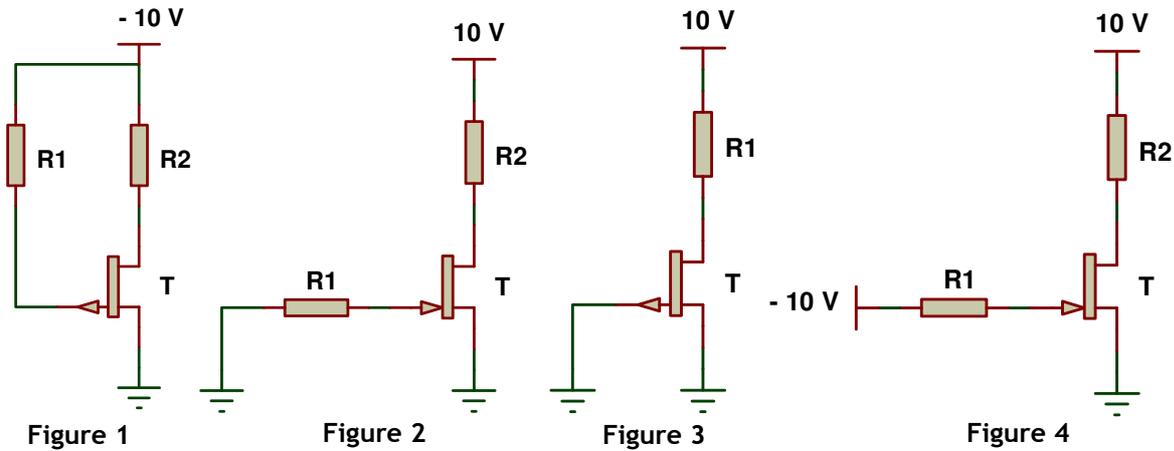


5-3- Schéma équivalent d'un JFET monté en Drain commun (d.c)



Exercice d'application V.1 :

Déterminer l'état du JFET (bloqué ou conducteur) pour chaque circuit électronique ci-dessous.



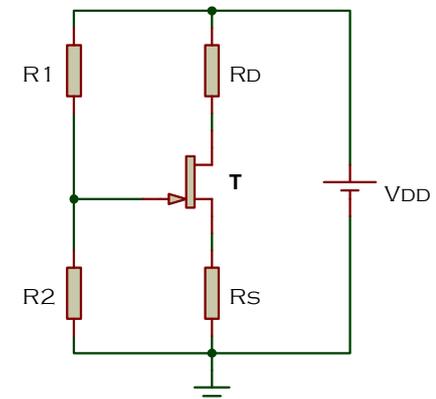
Exercice d'application V.2 :

On considère le circuit électronique ci-dessous.

1. Donner l'expression des droites DAS et DCS.
2. Déterminer puis placer le point de repos de T.

On donne :

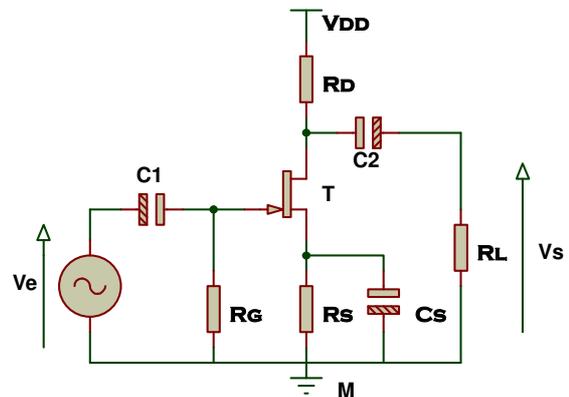
$R_1 = 5,1 \text{ M}\Omega$; $R_2 = 470 \text{ k}\Omega$; $R_D = 820 \Omega$; $R_S = 470 \Omega$;
 $V_{DD} = 20 \text{ V}$; $V_{GS} = -2 \text{ V}$.



Exercice d'application V.3 :

Soit le circuit électronique ci-dessous.

1. Etude en régime statique :
 - 1.1. Déterminer le schéma équivalent du circuit.
 - 1.2. De quel type de polarisation s'agit-il ?
 - 1.3. Déterminer le point de repos du transistor T.
2. Etude en régime dynamique :
 - 2.1. Comment est monté le transistor T ?
 - 2.2. Donner le schéma équivalent de T seul.
 - 2.3. Déterminer le schéma équivalent du circuit.



Hypothèses :

En régime statique, les sources variables sont éteintes et les condensateurs se comportent comme des circuits ouverts.

En régime dynamique, les sources continues sont éteintes et les condensateurs se comportent comme des circuits fermés.

On donne : $R_G = 150 \text{ k}\Omega$; $R_D = 390 \Omega$; $R_S = 270 \Omega$; $V_{DD} = 15 \text{ V}$; $V_{GS} = -3 \text{ V}$.

II - TRANSISTOR MOS OU MOSFET

1 - Présentation d'un MOSFET

1-1- Principe de fonctionnement

Appelé aussi MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Field Effet Transistor), le transistor MOS est comme le JFET avec une différence fondamentale. En effet, l'électrode de commande (la grille) est rigoureusement isolée du canal par une couche d'isolant - l'oxyde de silicium ou silice. Il existe deux (02) types de transistors MOS :

- ✓ Le MOSFET canal N ;
- ✓ Le MOSFET canal P.

Cependant pour chaque type de MOSFET deux (02) technologies différentes peuvent être utilisées. Ainsi nous avons :

- ✓ Les MOSFET à déplétion ou à appauvrissement ;
- ✓ Les MOSFET à enrichissement.

❖ **Les MOSFET à déplétion**

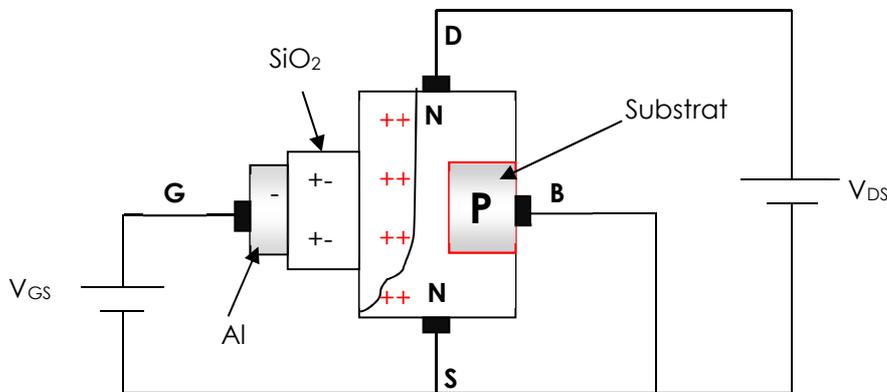


Figure I.2.1.a : Schéma de principe d'un MOSFET à déplétion canal N

Sur un substrat (B) dopé P sont diffusées deux zones très dopées N formant le drain (D) et la source (S) reliées par un canal dopé N.

Pour V_{GS} nulle et sous l'action de la tension drain-source V_{DS} , un courant drain I_D circule dans le canal. La largeur du canal diminue quand on se rapproche du drain.

Si V_{GS} est négative, 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 positive, la zone appauvrie en porteurs régresse dans le canal et le courant drain augmente.

Selon la valeur de la tension grille-source V_{GS} , le canal est plus ou moins conducteur. La tension grille commande la largeur du canal.

Il existe également des MOSFET à déplétion 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 MOSFET à appauvrissement, le canal est représenté par un trait continu. Une flèche figure sur la jonction substrat-canal et 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.

❖ Les MOSFET à enrichissement

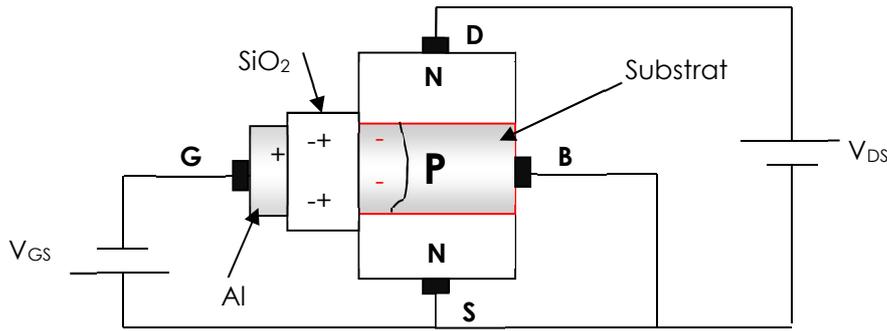


Figure I.2.1.b : Schéma de principe d'un MOSFET à enrichissement canal N

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.

Si V_{GB} est assez positive, 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} .

Si V_{GB} croît au-delà de ce seuil, la largeur 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 MOSFET à enrichissement, 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.

1-2- Définition

Le MOSFET est un JFET dont la grille est isolée de sa connexion par une couche isolante d'oxyde de silicium. C'est un transistor unipolaire. Suivant le type de charge qui se déplace, on obtient deux types de transistors MOS :

- ✓ Les MOSFET canal N : déplacement des électrons ;
- ✓ Les MOSFET canal P : déplacement des trous.

1-3- Symbole d'un MOSFET

Les MOSFET sont dotés également de trois (03) bornes : la grille (G), le drain (D) et la source (S). Sur chaque symbole, une flèche est portée par la source. Le symbole électrique d'un MOSFET se présente comme suit :



Figure I.2.2.a : Symbole électrique d'un MOSFET à déplétion

Pour les MOSFET canal N, les tensions V_{DS} et V_{GS} sont positives.

Pour les MOSFET canal P, les tensions V_{DS} et V_{GS} sont négatives.

Pour la suite du cours, sauf indication contraire, nous utiliserons un MOSFET canal N.

2 - Fonctions d'un MOSFET

Le MOSFET est un composant électronique commandé à partir de sa tension grille-source V_{GS} lui permettant ainsi de réaliser deux grandes fonctions : la commutation et l'amplification de signal.
Remarque : Le courant de Grille I_G est quasiment nul ($I_G = 0$ mA).

❖ **La commutation**

Le MOSFET se comporte comme un commutateur dont l'état dépend de la tension de commande V_{GS} .

- Si $V_{GS} \leq V_{TH}$, le MOSFET est dans un état bloqué

Alors $I_D = 0$ mA.

Par défaut, on prendra $V_{TH} = 1$ V.

V_{TH} : Tension de blocage ou tension de pincement par V_{GS} .

- Si $V_{GS} > V_{TH}$ et $V_{DS} \leq V_P$, le MOSFET est dans un état saturé

Alors $I_D = B \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{1}{2} V_{DS} \right) V_{DS}$.

$V_P = V_{GS} - V_{TH}$: Tension de pincement par V_{DS} .

❖ **L'amplification de signal**

Le MOSFET fonctionne comme un amplificateur de signal lorsqu'il est dans un état passant (non saturé) c'est-à-dire $V_{GS} > V_{TH}$ et $V_{DS} > V_P$

Alors $I_D = \frac{1}{2} B (V_{GS} - V_{TH})^2$

$B = \frac{W}{L} \mu \cdot C_{ox}$ et $K = \mu \cdot C_{ox}$

B ou K : Facteur du gain en A/V^2 .

W : Largeur du canal en μm .

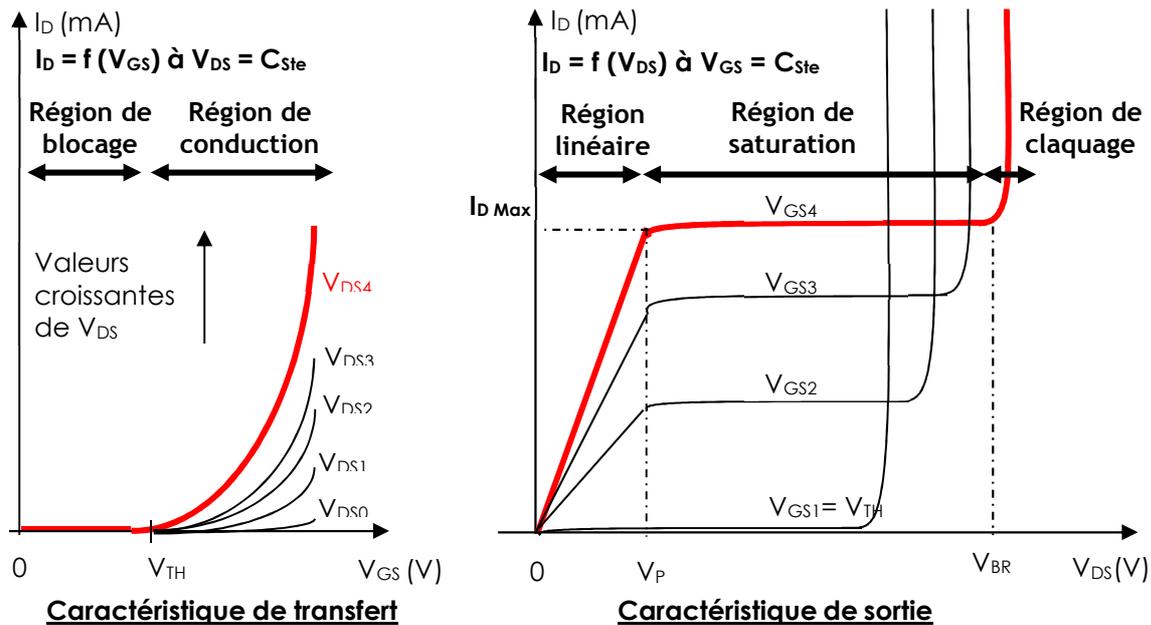
L : Longueur du canal en μm .

μ : Mobilité des électrons libres en cm^2/Vs .

C_{ox} : Capacité surfacique de grille en F/cm^2 .

3 - Caractéristiques statiques d'un MOSFET

Les caractéristiques statiques d'un MOSFET canal N se présentent comme suit :



La caractéristique de transfert d'un MOSFET comporte une région de blocage et une région de conduction. Quant à la caractéristique de sortie elle présente une région linéaire, une région de saturation et une région de claquage.

Le MOSFET est un transistor qui se comporte comme un circuit ouvert ou un conducteur selon la valeur de la tension V_{GS} entre la Grille et la Source.

- ✓ Tant que la tension $V_{GS} \leq V_{TH}$, le canal Drain-Source reste fermé. Aucun courant ne traverse le canal. Le MOSFET est bloqué. On dit qu'il fonctionne dans sa région de blocage.
- ✓ Une fois que $V_{GS} > V_{TH}$, le canal Drain-Source se débloque et l'ouverture s'élargie au fur et à mesure que la tension V_{GS} augmente. Le canal est parcouru par un courant appelé courant de drain et note I_D . Le MOSFET est conducteur. On dit qu'il fonctionne dans sa région de conduction.

Lorsque le MOSFET est conducteur, il présente deux (02) types de comportements selon la tension de Drain-Source (V_{DS}).

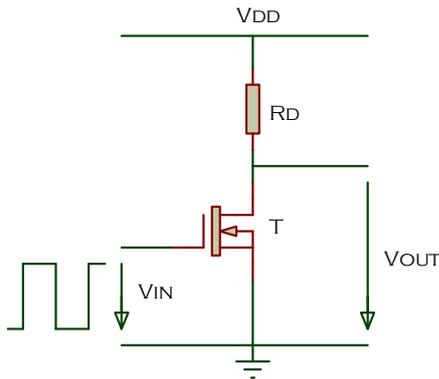
Si $0 \leq V_{DS} \leq V_P$, le canal se comporte comme une résistance (R_{DS}). Le courant de Drain I_D est proportionnel à la tension V_{DS} . La valeur de cette résistance dépend toutefois de la valeur de V_{GS} . On dit que le MOSFET fonctionne dans sa région ohmique ou linéaire.

Si $V_{DS} > V_P$, le courant I_D devient quasiment constant et indépendant de V_{DS} . Les variations de I_D sont quasiment proportionnelles à celles de V_{GS} . On dit que le MOSFET fonctionne dans sa région de saturation.

Au-delà d'une certaine tension $V_{DS} = V_{BR}$ (break down voltage drain - gate ou tension de rupture), le courant I_D traversant le MOSFET augmente très brusquement. Dans cette région qui correspond à la région de claquage, il y a destruction du MOSFET.

Exercice d'application V.4 :

Soit le circuit électronique ci-dessous.



On donne : $V_{DD} = 5 \text{ V}$; $R = 10 \text{ k}\Omega$; $V_{TH} = 1 \text{ V}$ et $\beta = 0,2 \text{ mA/V}^2$.
Calculer la tension V_{OUT} pour $V_{IN} = 0 \text{ V}$ et $V_{IN} = 5 \text{ V}$.

Exercice d'application V.5 :

Soit le circuit électronique ci-dessous.

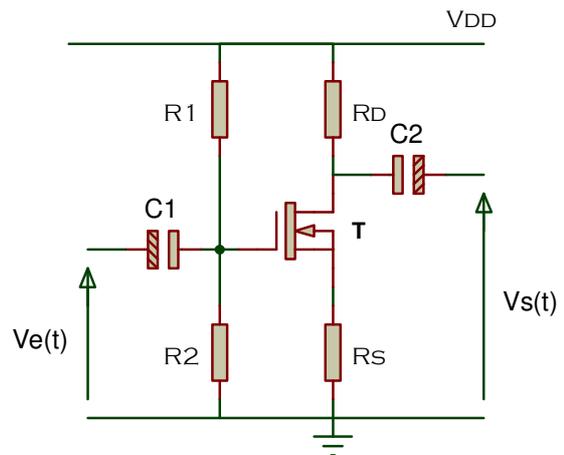
1. Etude en régime statique :
 - 1.1. Déterminer le schéma équivalent du circuit.
 - 1.2. De quel type de polarisation s'agit-il ?
 - 1.3. Déterminer le point de repos du transistor T.
2. Etude en régime dynamique :
 - 2.1. Comment est monté le transistor T ?
 - 2.2. Donner le schéma équivalent de T seul.
 - 2.3. Déterminer le schéma équivalent du circuit.

On donne :
 $R_1 = 220 \text{ k}\Omega$; $R_2 = 100 \text{ k}\Omega$; $R_D = 470 \Omega$; $R_S = 150 \Omega$;
 $V_{DD} = 15 \text{ V}$; $V_{GS} = 2,6 \text{ V}$; $V_{TH} = 2 \text{ V}$ et $\beta = 50 \text{ mA/V}^2$.

Hypothèses :

En régime statique, les sources variables sont éteintes et les condensateurs se comportent comme des circuits ouverts.

En régime dynamique, les sources continues sont éteintes et les condensateurs se comportent comme des circuits fermés.



CHAPITRE VI : LES CIRCUITS INTEGRES ANALOGIQUES

Objectifs du cours :

- Etre capable de définir chaque circuit intégré ;
- Etre capable d'identifier un circuit intégré ;
- Connaître les fonctions que peuvent réaliser chaque circuit intégré dans un montage ;
- Connaître les caractéristiques électriques de chaque circuit intégré ;
- Etre capable d'analyser un montage électronique comportant un circuit intégré.

Prérequis :

Durée du cours : 6 Heures

I - L'AMPLIFICATEUR OPERATIONNEL

1 - Présentation d'un amplificateur opérationnel

1-1- Définition

L'amplificateur opérationnel (AOP) est un composant électronique appartenant à la famille de circuits intégrés analogiques. C'est un amplificateur différentiel présentant un circuit complexe composé essentiellement de résistances, de diodes et de transistors, le tout intégré dans un boîtier.

1-2- Symbole et brochage

L'amplificateur opérationnel possède deux (02) bornes d'entrées, une borne de sortie et deux (02) bornes nécessaires à son alimentation.

La figure I.1.2.a nous montre, selon la norme américaine, le symbole d'un amplificateur opérationnel dans un schéma électronique. Le petit triangle indique le sens d'amplification. En général, les bornes d'alimentation ainsi que le petit triangle ne sont pas représentées.

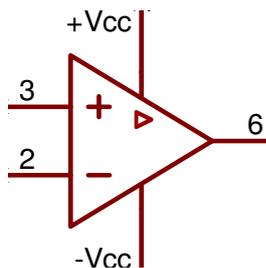


Figure I.1.2.a : Symbole d'un AOP

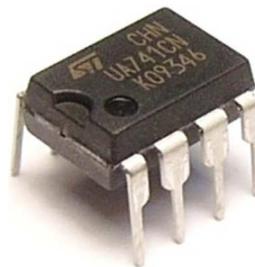


Figure I.1.2.b : UA741CN

L'amplificateur opérationnel (UA741, TL081, etc.) se présente le plus souvent sous la forme d'un boîtier DIL à 8 broches (Figure I.1.2.b).

Le brochage d'un AOP à 8 broches est le suivant (Figure I.1.2.c) :

- Broche 1 : Réglage de la tension de décalage
- Broche 2 : Entrée inverseuse
- Broche 3 : Entrée non inverseuse
- Broche 4 : Alimentation négative (-V_{CC})
- Broche 5 : Réglage de la tension de décalage
- Broche 6 : Sortie
- Broche 7 : Alimentation positive (+V_{CC})
- Broche 8 : Non connectée

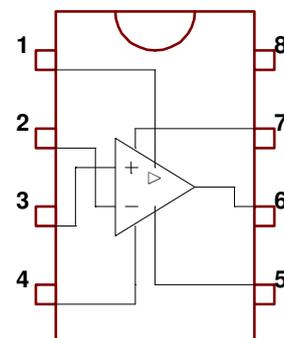


Figure I.1.2.c : Brochage d'un AOP

Toutefois, il est possible de se référer à la documentation technique de chaque composant.

1-3- Fonctions

L'amplificateur opérationnel est un circuit intégré qui permet de réaliser plusieurs fonctions :

❖ L'amplification du signal

L'AOP peut être utilisé comme un amplificateur de signal en ne modifiant que l'amplitude du signal d'entrée. On obtient donc $V_s(t) = k \cdot V_e(t)$

Lorsque $k > 1$: Amplificateur

Lorsque $k < 1$: Atténuateur

Lorsque $k = 1$: Suiveur

❖ Les opérations mathématiques

L'AOP est employé dans la conception des circuits analogiques pour effectuer des opérations mathématiques. Parmi ces opérations, nous avons l'addition, la soustraction, la dérivation, l'intégration et la comparaison.

❖ Les fonctions mathématiques

L'AOP est utilisé dans la conception des circuits analogiques pour générer des fonctions mathématiques telles que le logarithme népérienne, l'exponentielle et le sinus.

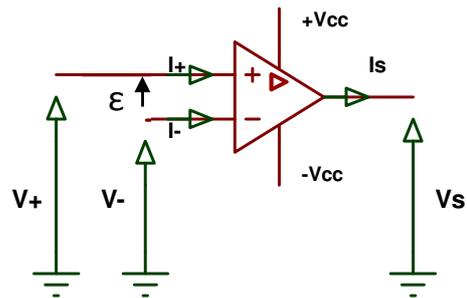
❖ Les filtres

L'une des fonctions d'un AOP dans des circuits analogiques peut être de sélectionner des composantes d'un signal selon la fréquence. A titre d'exemple, nous avons les filtres passe bas, les filtres passe haut et les filtres passe bande.

2 - Caractéristiques électriques d'un amplificateur opérationnel

L'amplificateur opérationnel possède des caractéristiques électriques parmi lesquelles nous avons :

- La tension différentielle d'entrée ;
- Les courants d'entrée et de sortie ;
- La tension de décalage ;
- La tension d'alimentation ;
- Les impédances d'entrée et de sortie ;
- L'amplification en tension ;
- La vitesse de montée ou le Slew Rate ;
- La bande passante ;



2-1- Les limites d'utilisation d'un AOP

❖ La tension différentielle d'entrée ϵ

La tension différentielle d'entrée est la différence de potentiels entre l'entrée non inverseuse et l'entrée inverseuse. On a : $\epsilon = V^+ - V^-$.

Le constructeur précise dans la documentation technique de chaque composant la valeur maximale de la différence de tension entre les deux (02) entrées.

❖ La tension d'alimentation V_{CC}

Pour son fonctionnement, l'AOP doit être alimenté par deux sources de tension continue notées $+V_{CC}$ et $-V_{CC}$. Ces sources de tension peuvent être symétriques ou asymétriques en fonction de l'application à réaliser.

Le constructeur de l'AOP fournit la tension d'alimentation maximale V_{CM} à ne pas dépasser au risque de détruire l'AOP. C'est un paramètre essentiel dans le choix de l'AOP.

❖ L'amplification en tension A_V

La tension de sortie de l'AOP est liée à sa tension d'entrée par un coefficient d'amplification : c'est l'amplification en tension A_V . On a : $A_V = \frac{V_s}{V_e}$

Le coefficient d'amplification en boucle ouverte A_0 propre à l'AOP est donné par le constructeur. Ce coefficient est très élevé et est de l'ordre de 10^5 . Toutefois, la valeur maximale de la tension de sortie de l'AOP ne peut en aucun cas excéder la valeur des tensions d'alimentations.

❖ **La vitesse de montée (Slew Rate)**

Le Slew Rate (SR) ou la vitesse de montée traduit l'aptitude de l'AOP à faire évoluer rapidement sa tension de sortie. Il s'exprime en $V/\mu s$.

$$\text{On a : } SR = \left. \frac{dV_s(t)}{dt} \right|_{t=0} = 2\pi F \cdot A_v \cdot V_{e \text{ Max}} = 2\pi F \cdot V_{s \text{ Max}}$$

La valeur théorique du Slew Rate (SR) doit être inférieure à celle donnée par le constructeur de l'AOP pour éviter la déformation du signal de sortie. Le Slew Rate est donc un paramètre essentiel dans le choix de l'AOP.

Exemples : UA741 (SR = 0,5 $V/\mu s$) ; TL081 (SR = 13 $V/\mu s$) et LF157 (SR = 50 $V/\mu s$)

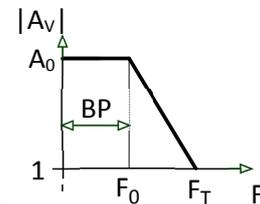
❖ **La Bande Passante**

La bande passante BP correspond à une bande de fréquences dans laquelle l'amplification en tension varie peu et est la plus élevée. La plus petite fréquence de cette bande de fréquence est appelée fréquence de coupure basse F_B et la plus grande fréquence de cette bande de fréquence est appelée fréquence de coupure haute F_H . Plus l'amplification en tension exigée est grande, plus la bande passante se réduit. On a : $F_C \cdot A_v = F_T$

F_T : Fréquence de transition (donnée par le constructeur de l'AOP)

F_C : Fréquence de coupure

A_v : Amplification en tension



La fréquence de transition est un paramètre essentiel dans le choix de l'AOP.

2-2- Les défauts d'un AOP - les caractéristiques d'entrée et sortie

❖ **Résistance et courants d'entrée**

La résistance d'entrée différentielle R_{ed} de l'AOP représente la résistance vue des deux entrées lorsque toutes les sources autonomes de tension et de courant sont éteintes. Cette résistance d'entrée est fournie par le constructeur de l'AOP et est très élevée ($M\Omega$).

Les courants d'entrée i^+ et i^- résultent des courants de polarisation (Input Bias Current) I_p et de décalage (Input Offset Current) I_d donnés par le constructeur de l'AOP.

$$\text{On a : } I_p = \frac{i^+ + i^-}{2} \text{ pour } v_s = 0 \text{ et } I_d = |i^+ - i^-| \text{ pour } v_s = 0$$

Ces courants d'entrée sont très faibles (nA) et ne sont pas forcément identiques. Ils sont parfois négligés dans la pratique.

Les courants de polarisation et de décalage apparaissent comme un défaut de l'AOP car ils sont à l'origine de la tension de décalage.

❖ **La tension de décalage V_d**

La tension de décalage V_d est la tension qu'il faut appliquer à l'entrée de l'AOP pour ramener la tension de sortie V_s à zéro lorsque les deux entrées de l'AOP sont reliées ($\epsilon = 0 V$). Elle se traduit par un décalage de la courbe de transfert $V_s = f(\epsilon)$ vers la droite ou vers la gauche par rapport à l'origine.

La tension de décalage est donnée par le constructeur et les AOP sont dotés de deux (02) entrées (1 et 5) de réglage qui permettent de corriger ce défaut de dissymétrie.

❖ **Résistance et courant de sortie**

La résistance de sortie R_s est la résistance vue de la sortie de l'AOP lorsque les entrées de l'AOP sont court-circuitées et toutes les sources autonomes de tension et de courant sont éteintes. Cette résistance de sortie est très faible (Ω).

Le courant I_s à la sortie de l'AOP est faible (mA). Le constructeur de l'AOP fournit le courant de sortie en court-circuit I_{s0} (Output Short-Circuit Current).

L'AOP se comporte en sortie comme un générateur de tension en série avec une résistance.

Schéma équivalent d'un AOP vue de la sortie :

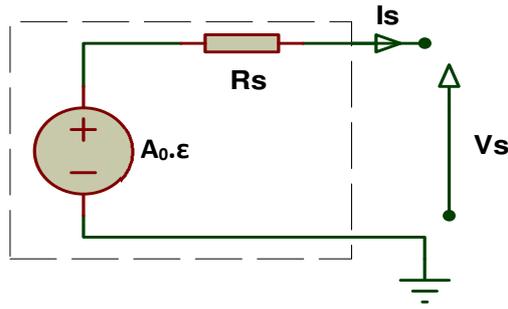


Figure I.2.2.b : Schéma équivalent d'un AOP vue de la sortie

3 - Approximation et régimes de fonctionnement d'un amplificateur opérationnel

Au vu des valeurs très élevées ou très faibles de certaines caractéristiques électriques des amplificateurs opérationnels, il est possible de simplifier l'étude des circuits électroniques à base d'AOP en considérant l'AOP comme idéal (ou parfait).

Les caractéristiques d'un amplificateur opérationnel idéal sont :

- L'amplification en tension en boucle ouverte A_0 propre à l'AOP est infinie ($A_0 \rightarrow \infty$) ;
- La résistance d'entrée différentielle R_{ed} est infinie ($R_{ed} \rightarrow \infty$) ;
- Les courants d'entrée i^+ et i^- sont nuls ($i^+ = i^- = 0 \text{ mA}$) ;
- La résistance de sortie R_s est nulle ($R_s = 0 \Omega$) ;
- La bande passante BP est infinie ($BP = [0 \text{ Hz} ; +\infty[$).

Les figures I.3.a et I.3.b représentent respectivement le symbole d'un AOP idéal et son schéma équivalent.

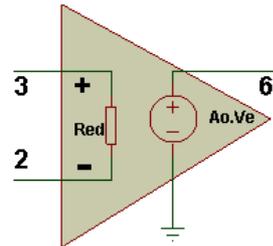
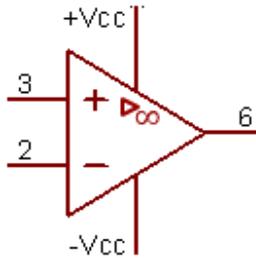


Figure I.3.a : Symbole d'un AOP idéal Figure I.3.b : Schéma équivalent d'un AOP idéal

La caractéristique de transfert $V_s = f(\epsilon)$ d'un amplificateur opérationnel idéal se présente comme suit :

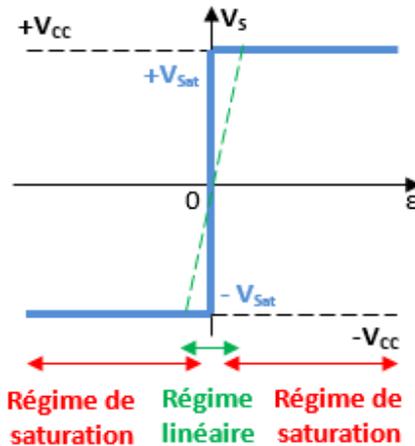


Figure I.3.c : Caractéristique de transfert d'un AOP idéal

Cette caractéristique idéale de l'AOP nous permet de distinguer trois (03) régions définissant ses deux (02) modes ou régimes de fonctionnement :

- Le régime de saturation ;
- Le régime linéaire.

3-1- Le régime de saturation

Lorsque cette tension de sortie V_S est égale à $+V_{Sat}$ ou $-V_{Sat}$, l'AOP est dit fonctionnant en régime de saturation ou encore en régime non linéaire. On a :

- Lorsque $\varepsilon < 0$, $V_S = -V_{Sat}$ AOP fonctionne comme un comparateur
- Lorsque $\varepsilon > 0$, $V_S = +V_{Sat}$

De manière théorique, on prendra $V_{Sat} = V_{CC}$. Mais il est bien de savoir que dans la pratique, la valeur de la tension de saturation V_{Sat} est légèrement inférieure à la valeur de la tension V_{CC} alimentant l'AOP.

3-2- Le régime linéaire

Lorsque la tension de sortie V_S de l'AOP est comprise entre $-V_{Sat}$ et $+V_{Sat}$, l'AOP est dit fonctionnant en régime linéaire : $\varepsilon = 0$ et $-V_{Sat} < V_S < +V_{Sat}$

L'approximation idéalisée de l'amplificateur opérationnel ne permet pas d'observer convenablement le régime linéaire. En considérant maintenant que le coefficient d'amplification A_0 propre à l'AOP n'est plus infini mais simplement très grand, on obtient un régime linéaire étroit où $V_S = A_0 \cdot \varepsilon$.

Toutefois, une faible variation de ε entraîne la saturation de l'amplificateur. En pratique, l'amplificateur opérationnel est donc rarement utilisé tel quel, c'est-à-dire en boucle ouverte. On lui applique plutôt une contre réaction.

4 - Intérêt de la contre réaction

Il est difficile de contrôler le mode de fonctionnement de l'AOP car le coefficient d'amplification A_0 propre à l'AOP est très important et une faible variation de la tension différentielle d'entrée est suffisante pour saturer l'AOP. Ainsi, pour avoir un parfait contrôle du mode de fonctionnement de l'AOP, le bouclage de la sortie sur une entrée est nécessaire. C'est le principe de la contre réaction.

La contre réaction consiste donc à prélever une fraction de la tension de sortie et l'injecter à l'entrée dans le but d'obtenir une tension différentielle d'entrée contrôlable.

Il existe deux (02) types de contre réaction :

- La contre réaction positive :

C'est le bouclage de la sortie sur l'entrée non inverseuse de l'AOP.

- La contre réaction négative :

C'est le bouclage de la sortie sur l'entrée inverseuse de l'AOP.

5 - Méthodologie d'analyse du mode de fonctionnement d'un AOP

Pour déterminer le mode de fonctionnement d'un AOP dans un montage, l'on peut se poser un certain nombre de questions :

Question 1 : Existe-il une liaison entre l'entrée inverseuse et la sortie ?

- Si la réponse est OUI, passer à la question 2 ;
- Si la réponse est NON, l'AOP fonctionne en Régime Non Linéaire (RNL).

Question 2 : Existe-il une liaison entre l'entrée non-inverseuse et la sortie ?

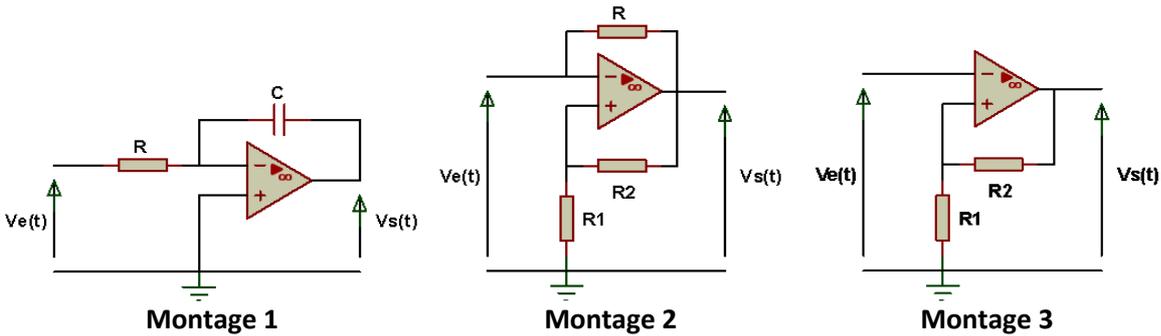
- Si la réponse est OUI, passer à la question 3 ;
- Si la réponse est NON, l'AOP fonctionne en Régime Linéaire (RL).

Question 3 : Le signal d'entrée (de commande) est-il indépendant ?

- Si la réponse est OUI, l'AOP fonctionne en Régime Linéaire (RL) ;
- Si la réponse est NON, l'AOP fonctionne en Régime Non Linéaire (RNL).

Exercice d'application I.1 :

On considère les trois (03) montages électroniques ci-dessous.



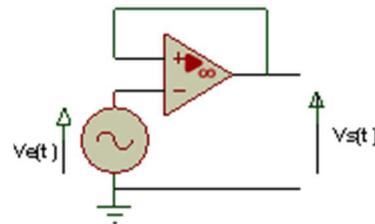
Pour chaque montage déterminer son mode de fonctionnement.

Exercice d'application I.2 :

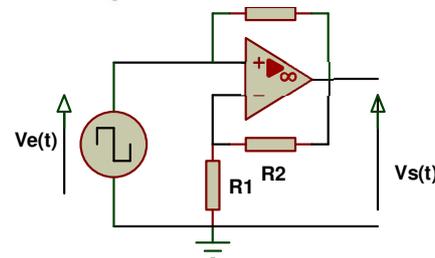
Dans cet exercice, on se propose de déterminer la ou les bonne(s) réponse(s) pour chaque question posée.

- 1 - La sortie d'un AOP ne peut en aucun cas être saturée si :
 - (a) Le montage possède une contre réaction
 - (b) Le montage est en boucle ouverte
 - (c) L'AOP est idéal et le signal d'entrée est indépendant
 - (d) Toutes les réponses sont correctes
- 2 - Un AOP dans un montage fonctionne en mode non linéaire si :
 - (a) Le montage est en boucle ouverte
 - (b) Le montage ne possède pas de contre réaction négative et le signal d'entrée est indépendant
 - (c) Le montage possède une contre réaction positive et le signal d'entrée n'est pas indépendant
 - (d) Aucune réponse n'est correcte

- 3 - Soit le circuit électronique ci-contre.
 - (a) $V_s(t) = V_e(t)$
 - (b) $V_s(t) = 0$
 - (c) $V_s(t) = \pm V_{Sat}$
 - (d) $V_s(t) = -V_e(t)$



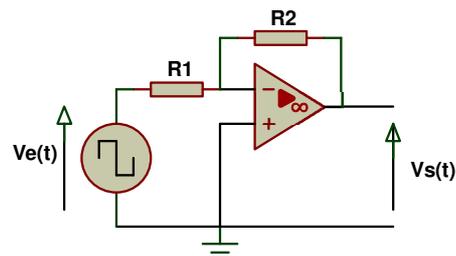
- 4 - Soit le circuit électronique ci-contre. L'AOP fonctionne :
 - (a) En régime saturé
 - (b) En régime linéaire
 - (c) Tout dépend du signal d'entrée
 - (d) Aucune réponse n'est correcte



- 5 - Soit le circuit électronique ci-contre. On donne $R_1 = 1\text{ K}\Omega$, $R_2 = 10\text{ K}\Omega$ et $V_{CC} = \pm 15\text{ V}$

Compléter :

$V_{e\text{ Max}}$	0,5 V	1 V	1,5 V	2 V
$V_{s\text{ Max}}$				



II - LE REGULATEUR INTEGRE DE TENSION

1 - Présentation d'un régulateur intégré de tension

1-1- Définition

Le régulateur intégré de tension (RIT) est un composant électronique appartenant également à la famille de circuits intégrés analogiques. C'est une intégration de composants dans un seul boîtier permettant de délivrer une tension de sortie stable quel que soit les variations de la tension à son entrée dans une plage définie par le constructeur. Il est composé essentiellement de résistances, de diodes et de transistors.

1-2- Classification, symbole et brochage

Il existe énormément de circuits intégrés pour réguler des tensions positives et négatives. Les régulateurs intégrés de tension peuvent être classés en deux (02) grandes familles : les régulateurs intégrés de tension fixe et les régulateurs intégrés de tension ajustable.

- Régulateur intégré de tension fixe :

Les régulateurs intégrés de tension fixe sont conçus pour délivrer une tension de sortie régulée fixe. Les plus courants de ces régulateurs sont ceux de la série 78XX et 79XX. Ils sont très faciles à mettre en œuvre et il suffit de peu de connaissances pour savoir lequel utiliser. La nomenclature de ces régulateurs donne certaines informations sur le composant. Par exemple

78 = signifie qu'il s'agit d'un RIT fixe positif

79 = signifie qu'il s'agit d'un RIT fixe négatif

XX = tension de sortie fixe (valeur entière sur deux chiffres).

La figure II.1.2.a nous montre le symbole d'un régulateur intégré de tension fixe dans un schéma électronique.

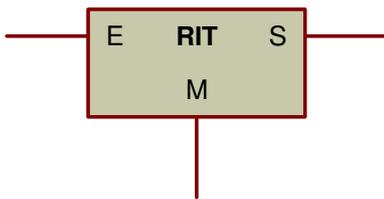


Figure II.1.2.a : Symbole d'un RIT fixe

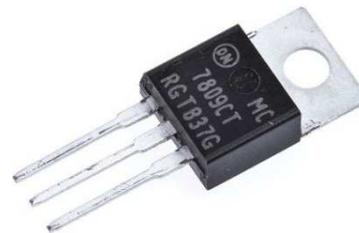


Figure II.1.2.b : MC7809CT

Le brochage de chaque RIT est spécifié dans sa documentation technique.

Exemples de brochage (boîtier To 220) :

- Broche E : Entrée
- Broche M : Masse
- Broche S : Sortie

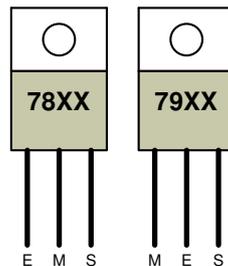


Figure II.1.2.c : Brochage d'un RIT fixe

- Régulateur intégré de tension ajustable :

Les régulateurs intégrés de tension ajustables sont conçus pour fournir une tension de sortie pouvant prendre une valeur régulée quelconque dans une plage spécifiée par le constructeur. Le symbole d'un régulateur intégré de tension ajustable se présente comme suit (figure II.1.2.d) :

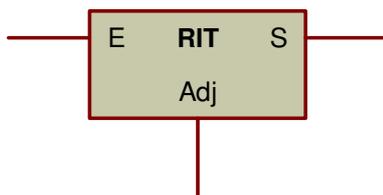


Figure II.1.2.d : Symbole d'un RIT ajustable



Figure II.1.2.e : LM317T

Les plus courants de ces régulateurs sont ceux de la série 317 (RIT ajustable positif) et 337 (RIT ajustable négatif).

Le brochage de chaque RIT ajustable est également spécifié dans sa documentation technique.

Exemples de brochage (boîtier To 220) :

- Broche A_{dj} : Ajustement
- Broche S : Sortie
- Broche E : Entrée

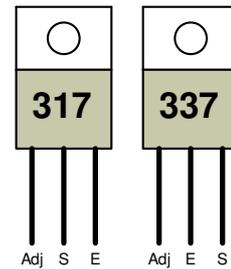
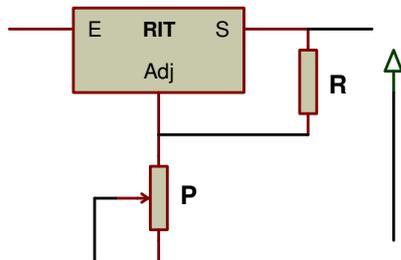


Figure II.1.2.f : Brochage d'un RIT ajustable

Tout comme le régulateur fixe, le régulateur ajustable possède une broche d'entrée et une broche de sortie. La différence réside dans l'emploi de la troisième broche, qui n'est plus une broche de masse, mais une broche de référence. C'est par le biais de cette broche qu'il est possible de régler la tension de sortie du régulateur. En général, deux résistances externes sont utilisées pour régler la tension de sortie de ces régulateurs à la valeur désirée. Le schéma classique se présente comme suit (figure II.1.2.g) :



Pour la quasi-totalité de ces régulateurs, la tension de sortie minimale est $V_{ref} = 1,25 \text{ V}$.
Ainsi, on a : $V_S = (1 + \frac{P}{R})V_{ref}$

Figure II.1.2.g : Schéma classique d'un RIT ajustable

1-3- Fonctions

Un régulateur intégré de tension sert à maintenir la tension à sa sortie constante et stable quel que soit les fluctuations, dans une certaine plage, du courant de charge et également de la tension à son entrée.

2 - Caractéristiques électriques d'un RIT

2-1- Tension de sortie

C'est la tension régulée que peut fournir un régulateur intégré de tension en sortie dans des conditions de fonctionnement spécifiées dans sa documentation technique.

Dans le cas des régulateurs intégrés de tension fixe, les valeurs des tensions de sortie sont normalisées et on a : 5 V ; 6 V ; 8 V ; 9 V ; 10 V ; 12 V ; 15 V ; 18 V et 24 V.

Quant aux régulateurs intégrés de tension ajustable, la tension de sortie peut se situer entre 1,25 V et 57 V.

2-2- Tension d'entrée

Tout régulateur intégré de tension est capable de supporter une tension sur son entrée jusqu'à une certaine valeur. La valeur maximale admissible à l'entrée est indiquée par le constructeur pour chaque composant.

Pour que le régulateur délivre la tension de sortie indiquée par le constructeur, il faudrait que la tension d'entrée ne soit pas en dessous d'une valeur minimale également indiquée par le constructeur. En général, on prend comme condition de fonctionnement $|V_S - V_E| \geq 3 \text{ V}$.

- V_S : Tension à la sortie du régulateur
- V_E : Tension minimale à l'entrée du régulateur

2-3- Courant maximal de sortie

Le courant que fournit le régulateur en sortie est fonction de la charge. Cependant, ce courant ne peut dépasser la valeur maximale donnée dans la documentation technique par le constructeur du composant. Il est aussi bien de savoir que le courant à l'entrée du RIT est égal au courant à sa sortie.

Pour la conception, on choisit en général un courant de sortie I_S tel que $I_S \leq \frac{1}{3} I_{S \text{ Max}}$

3 - Nomenclature d'un RIT

Le nom du constructeur, le type de tension, le courant maximal de sortie, la tension de sortie, la tolérance et le type de boîtier sont le plus souvent préciser dans la nomenclature des régulateurs intégrés de tension.

3-3- Le nom du fabricant

MC : Motorola
LM, LF : Motorola ; National
UA : Fairchild
TDB: Thomson, Semi-conducteur
RCA, CA: RCA
TI, TL: Texas Instruments
SFC: SESCOSEM

3-4- Le type de Tension

78 ou 28 : RIT fixe positive
79 ou 29 : RIT fixe négative
317 ou 117 : RIT ajustable positive
337 ou 137 : RIT ajustable négative

3-5- Le courant maximal de sortie et type de boîtier (To)

L : $I_{S \text{ Max}} = 100 \text{ mA}$; To 92
M : $I_{S \text{ Max}} = 500 \text{ mA}$; To 5 et To 39
 : $I_{S \text{ Max}} = 1 \text{ A}$; To 220
T : $I_{S \text{ Max}} = 1,5 \text{ A}$; To 3 et To 220
S : $I_{S \text{ Max}} = 2 \text{ A}$; To 3 et To 220
K : $I_{S \text{ Max}} = 3 \text{ A}$; To 3

3-6- La tolérance sur la tension de sortie

B, C, K : Tolérance $\pm 4 \%$
A, AC : Tolérance $\pm 2 \%$

Exemple : RIT MC78T12ACK

MC : Motorola
78 : RIT fixe positif
T : Courant maximal de sortie $I_{S \text{ Max}} = 1,5 \text{ A}$
12 : Tension de sortie $V_S = 12 \text{ V}$
AC : Tolérance $\pm 2 \%$
K : Boîtier To 3

III - LE NE555

1 - Présentation du NE555

1-1- Définition

Le NE555 est un composant électronique appartenant à la famille de circuits intégrés analogiques. C'est une intégration de composants dans un seul boîtier permettant de générer des signaux de temporisation. Les composants élémentaires du NE555 sont essentiellement les résistances, les diodes et les transistors.

1-2- Symbole et brochage

Faisant partie de l'un des circuits intégrés le plus utilisé en électronique, le symbole d'un NE555 dans un schéma électronique se présente de la manière suivante (figure III.1.2.a).

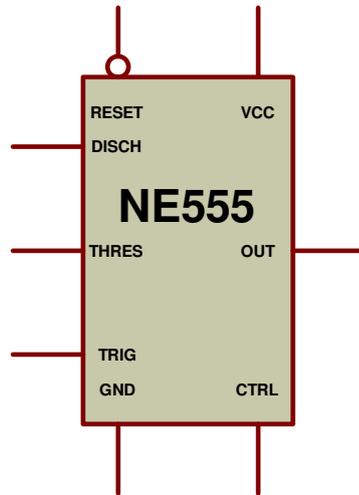


Figure III.1.2.a : Symbole d'un NE555

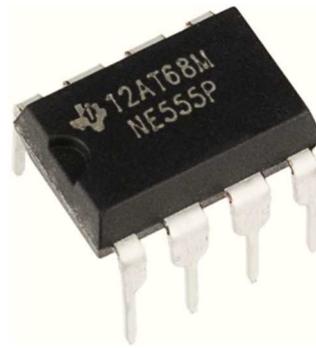


Figure III.1.2.b : NE555P

Le NE555 est le plus souvent sous la forme d'un boîtier DIL à 8 broches (Figure III.1.2.c) et son brochage est le suivant :

- Broche 1 : Masse (GND)
- Broche 2 : Entrée de déclenchement (TRIG)
- Broche 3 : Sortie principale (OUT)
- Broche 4 : Entrée de remise à zéro (RESET)
- Broche 5 : Sortie de contrôle (CTRL)
- Broche 6 : Entrée de basculement (THRES)
- Broche 7 : Sortie de déchargement (DISCH)
- Broche 8 : Alimentation (VCC)

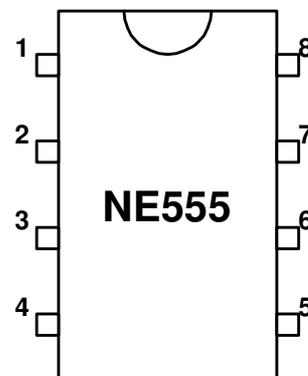


Figure III.1.2.c : Brochage d'un NE555

Toutefois, il est possible de se référer à la documentation technique du composant.

Il est aussi bien de savoir que plusieurs fabricants réalisent ce circuit intégré sous des appellations différentes. Comme exemples, nous avons :

- Motorola : MC1455
- Fairchild : NE555
- Texas instruments : SN52555
- National : LM555C

1-3- Structure interne et principe de fonctionnement

La structure interne simplifiée du NE555 est constituée de :

- 3 résistances configurées en diviseur de tension ;
- 2 comparateurs ;
- 1 bascule RS contrôlée par les comparateurs ;
- 1 inverseur ;
- 1 transistor pour décharger le condensateur (externe au NE555) de temporisation.

L'ensemble de ces éléments sont agencés comme suit (figure III.1.3.a) :

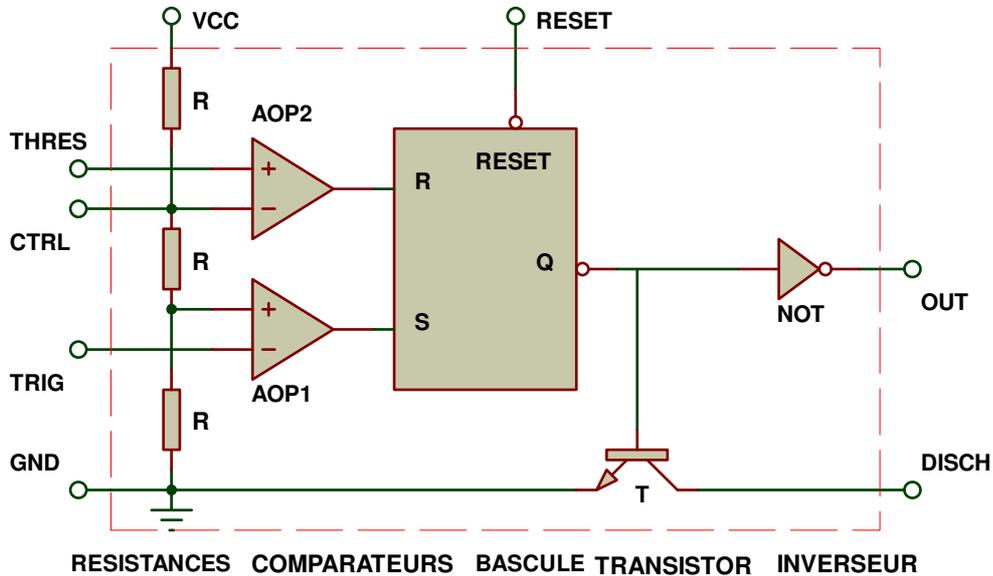


Figure III.1.3.a : Structure interne simplifiée du NE555

À l'intérieur du NE555, les trois (03) résistances R de même valeur permettent de diviser la tension d'alimentation V_{CC} en 3 parts égales. Le but est de fournir aux comparateurs AOP1 et AOP2 une tension de référence respectivement égale à $1/3$ et $2/3$ de la tension d'alimentation.

La sortie du comparateur AOP1 est au niveau HAUT uniquement si la tension à la broche 2 (TRIG) est inférieure à $1/3$ de la tension d'alimentation. Quant à la sortie du comparateur AOP2, elle est au niveau HAUT seulement si la tension à la broche 6 (THRES) est supérieure à $2/3$ de la tension d'alimentation.

La sortie Q de la bascule RS est fonction de ses entrées R, S et RESET. Son fonctionnement est décrit par le tableau III.1.3.a ci-dessous.

Tableau III.1.4.a : Table de vérité de la bascule

RESET	S	R	Q_n
0	X	X	0
1	1	X	1
1	0	1	0
1	0	0	Q_{n-1}

Niveau BAS = 0

Niveau HAUT = 1

Niveau précédent = Q_{n-1}

Le transistor T se comporte comme un interrupteur dont l'état dépend du niveau de la sortie Q de la bascule :

- ✓ Si Q est au niveau HAUT, T est équivalent à un interrupteur ouvert ;
- ✓ Si Q est au niveau BAS, T est équivalent à un interrupteur fermé.

Rappelons au passage que les niveaux BAS et HAUT de la sortie des comparateurs, de la bascule et de l'inverseur correspondent respectivement à une tension de 0 V et V_{CC} .

1-4- Fonctions

Le NE555 est un circuit intégré qui permet de réaliser plusieurs fonctions :

❖ **Générateur d'impulsion**

Le NE555 peut être utilisé pour générer en sortie (OUT) une impulsion commandée à partir de son entrée de déclenchement (TRIG). La durée de cette impulsion est définie à l'aide d'une résistance et d'un condensateur, composants externes, que l'on rajoute au NE555 pour le faire fonctionner en monostable comme l'illustre la figure ci-dessous.

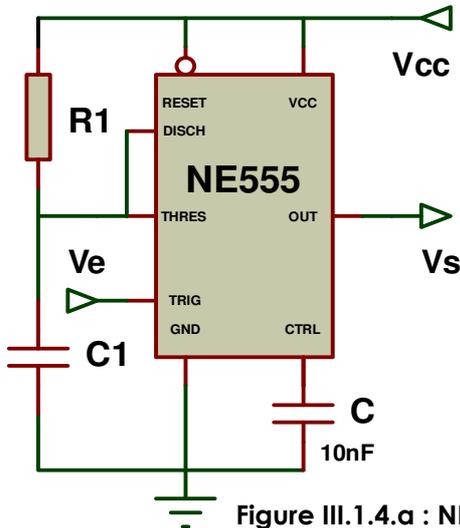


Figure III.1.4.a : NE555 configuré en monostable

Lorsque le signal de commande est au niveau BAS c'est-à-dire $V_e < \frac{1}{3}V_{CC}$, la sortie principale (OUT) du NE555 est au niveau HAUT pendant exactement une durée $t_H = 1,1 \times R_1 C_1$.

A partir de t_H , la tension à l'entrée de basculement (THRES) devient supérieure à $\frac{2}{3}V_{CC}$ et occasionne le passage de la sortie (OUT) du NE555 à un niveau BAS.

Toutefois, seul un niveau BAS de l'entrée de mise à zéro (RESET) peut forcer le passage d'un niveau HAUT à un niveau BAS la sortie principale du NE555.

❖ **L'oscillateur**

Le NE555 peut être utilisé comme un oscillateur délivrant un signal rectangulaire en sortie. Des composants externes, deux résistances et un condensateur, sont joints au NE555 et permettent de modifier la fréquence d'oscillations ainsi que le rapport cyclique. Le NE555 est configuré en astable pour réaliser cette fonction et son schéma se présente comme suit (figure III.1.4.b) :

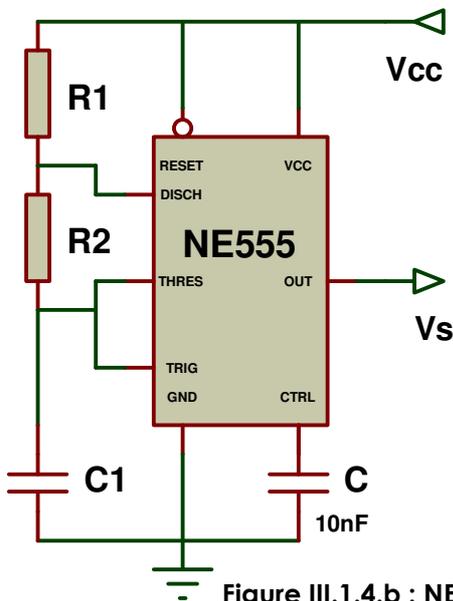


Figure III.1.4.b : NE555 configuré en astable

Les charges et décharges successives du condensateur C_1 engendrent un signal sur les entrées de basculement (THRES) et de déclenchement (TRIG) permettant de commander de la sortie du NE555.

Ainsi, pendant la charge et la décharge du condensateur C_1 , la sortie principale (OUT) du NE555 oscille continuellement entre un niveau HAUT et un niveau BAS pendant les durées respectives $t_H = 0,7 \times (R_1 + R_2) C_1$ et $t_B = 0,7 \times R_2 C_1$.

Toutefois, seul un niveau BAS de l'entrée de mise à zéro (RESET) peut stopper les oscillations de la sortie principale du NE555.

On appelle rapport cyclique α d'un signal périodique le rapport sur une période de la durée du niveau HAUT sur la période de ce signal.

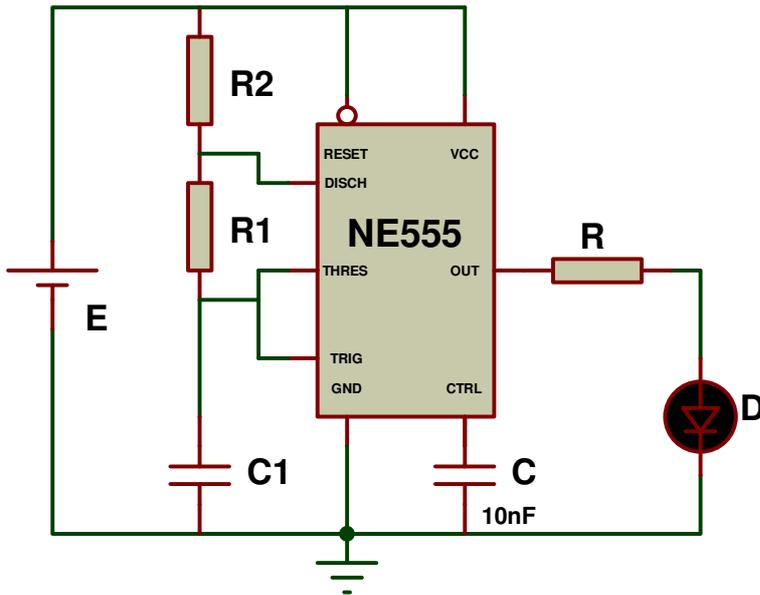
2 - Caractéristiques électriques du NE555

Les principales caractéristiques du NE555 sont la tension d'alimentation et le courant maximal de sortie. Ces différentes données sont spécifiées dans la documentation technique du composant par le constructeur.

Le NE555 peut fonctionner sous une tension d'alimentation comprise entre 4,5 V minimale et 16 V maximale. La sortie principale (OUT) du NE555 peut fournir un courant maximal en sortie de 200 mA.

Exercice d'application III.1 :

Soit le circuit électronique ci-dessous réalisé à partir d'un NE555.

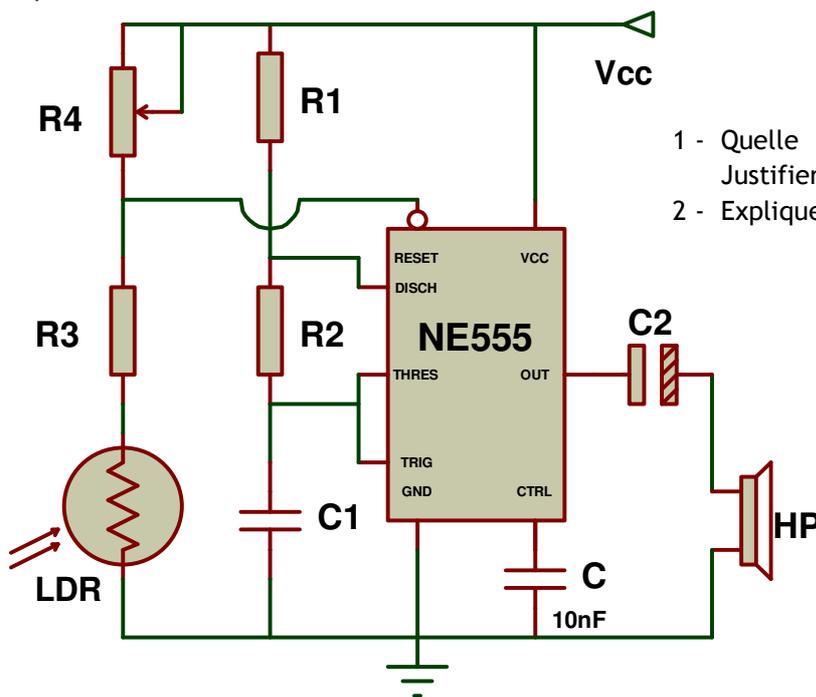


On donne :
 $E = 9 \text{ V}$; $C_1 = 1 \mu\text{F}$; $R = 820 \Omega$;
 $R_1 = 470 \text{ K}\Omega$; $R_2 = 1 \text{ K}\Omega$;
 $D : (\Phi = 3 \text{ mm} ; \text{Orange})$

- 1 - Quelle fonction réalise le NE555 ? Justifier votre réponse.
- 2 - Quel est l'état de la LED D pendant la charge puis la décharge du condensateur C_1 ? Justifier votre réponse.
- 3 - Quelle fonction réalise ce circuit électronique ?
- 4 - Déterminer la fréquence de clignotement de la LED D.
- 5 - Tracer sur le même graphe les oscillogrammes des tensions $V_{C_1}(t)$ et $V_{OUT}(t)$.
- 6 - On désire contrôler manuellement le clignotement de la LED D. Proposer un schéma à base de NE555.

Exercice d'application III.2 :

On se propose d'étudier le fonctionnement d'un détecteur d'obscurité dont le circuit est donné par la figure ci-dessous. La valeur de résistance de la photorésistance LDR varie en fonction de la lumière reçue. Plus la lumière reçue par la photorésistance est forte, moins la valeur de la résistance est importante.



- 1 - Quelle fonction réalise le NE555 ? Justifier votre réponse.
- 2 - Expliquer le fonctionnement du circuit.