

Chelly Nizar

Support de cours
Électronique Analogique

ISET Zaghuan 2010/2012

Table des matières

1	Propriétés électriques des semi conducteurs	3
1.1	Définition des semi conducteurs	3
1.2	Le dopage	4
1.2.1	Le dopage P	4
1.2.2	Le dopage N	4
1.3	La jonction	5
1.3.1	La jonction élémentaire	5
1.3.2	La jonction polarisé en inverse	6
1.3.3	La jonction polarisé en direct	6
2	Redressement monophasé	7
2.1	Objectif	7
2.2	La diode	7
2.2.1	Caractéristique de la diode	8
2.2.2	Modèle électrique de la diode	8
2.3	Redressement double alternance	9
2.3.1	Principe de fonctionnement	9
2.4	Pont de Graëtz	11
2.4.1	Schéma	11
2.4.2	Analyse du fonctionnement	11
2.5	Grandeurs caractéristiques	12
2.6	Filtrage par condensateur	13
2.7	Débit sur charge active R, E	15
3	Le Transistor bipolaire	16
3.1	Introduction	16
3.2	Description et symbole	16
3.3	Effet transistor	16
3.4	Relations fondamentales d'un transistor	17
3.5	Réseaux de caractéristique	17
3.5.1	Le montage émetteur commun	18
3.5.2	Polarisation du transistor	18
3.6	Réalisation pratique de la polarisation	20
3.6.1	Par pont de base et résistance d'émetteur	21
3.7	Transistor en régime variable	21
3.7.1	Schéma équivalent du transistor en dynamique	21
3.7.2	Schéma équivalent d'un amplificateur à transistor	22

4	L'amplificateur opérationnel	25
4.1	Généralités	25
4.2	Présentation et symboles	25
4.3	Montages fondamentaux	26
4.3.1	Montage inverseur idéal	26
4.3.2	Montage non inverseur	26
4.3.3	Montage suiveur	27
4.4	Applications des amplificateurs opérationnels	27
4.4.1	Montage sommateur	27
4.4.2	Montage soustracteur	27
4.4.3	Montage intégrateur idéal	28
4.4.4	Montage dérivateur idéal	29
	Bibliographie	30

Chapitre 1

Propriétés électriques des semi conducteurs

De nombreux composants électroniques mettent à profit les propriétés de conduction électrique des semi conducteurs. Ce chapitre décrit comment un semi conducteur conduit un courant électrique et en quoi il se distingue d'un métal.

1.1 Définition des semi conducteurs

Le matériau principalement employé actuellement dans la technologie des semi-conducteurs est le SILICIUM. Il est issu du sable que l'on purifie. Le silicium pur a une couleur anthracite et est cassant comme le verre. Sa résistivité est importante : $2,3 \cdot 10^7 \Omega \cdot m$. En comparaison, le cuivre a une résistivité de $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$. On peut donc considérer le silicium pur comme un isolant. Sa couche périphérique comprend 4 électrons ce qui est particulier du groupe des semi-conducteurs. Le silicium pur (symbole chimique : Si) aussi appelé à

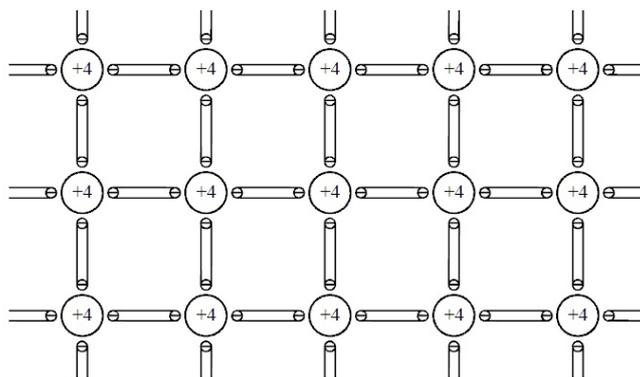


FIGURE 1.1 – Le cristal de Silicium pur.

conductibilité intrinsèque ne peut être utilisé directement. Pour qu'il devienne conducteur, il faut diminuer sa résistivité. Il faut donc faire apparaître des élec-

trons libres ou des lacunes pour avoir un terrain propice au passage du courant électrique.

1.2 Le dopage

On va mélanger des corps ayant 3 ou 5 électrons en couche périphérique avec le silicium. Ce mélange, après fusion, donne un alliage avec de nouvelles caractéristiques.

1.2.1 Le dopage P

On mélange au silicium des atomes avec 3 électrons en couche périphérique (Indium, Gallium, Aluminium). A chaque endroit où s'est glissé un atome trivalent dans l'alliage, il manque une liaison cristalline. Cette lacune ou ce trou représente une charge électrique positive. Un électron libre (ayant laissé un trou en quittant son orbite) peut combler ce trou. Le phénomène se répétant, on assiste à un mouvement de trous, donc à un courant électrique.

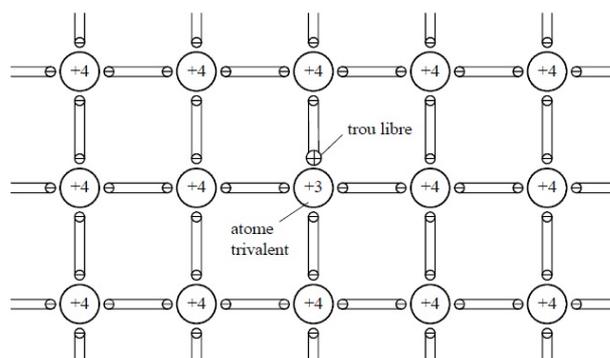


FIGURE 1.2 – Le cristal de Silicium dopé positivement.

Le cristal de silicium dopé de cette manière a nettement baissé sa résistivité (de l'ordre de $10^{-3}\Omega.m$). Cette baisse est due à l'adjonction de matière créant des trous. Ces trous représentent des charges POSITIVES. On a obtenu du silicium dopé P ou Si P.

1.2.2 Le dopage N

On mélange au silicium des atomes avec 5 électrons en couche périphérique (phosphore, arsenic, antimoine). L'alliage résultant laisse apparaître 1 électron libre pour chaque atome pentavalent dans la structure cristalline. Cet électron est libre, comme dans le cas précédent, il abaisse la résistivité du cristal et participe à la conduction électrique.

Le cristal ainsi obtenu, s'il est soumis à une tension, va laisser circuler le courant en fonction de sa résistivité.

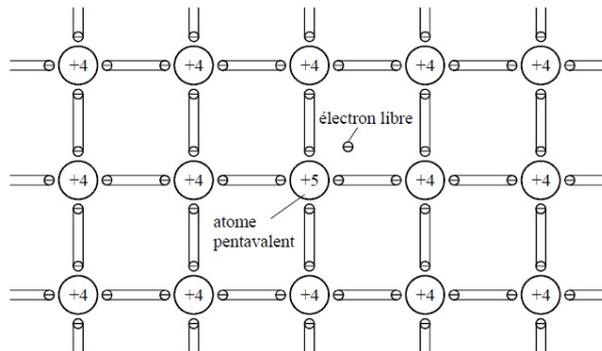


FIGURE 1.3 – Le cristal de Silicium dopé négativement.

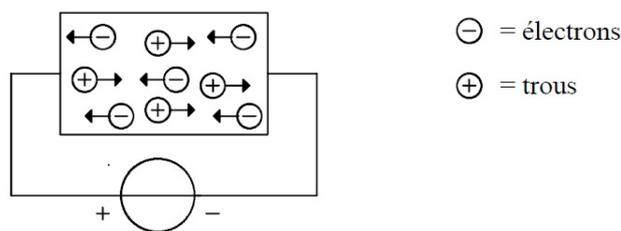


FIGURE 1.4 – Les électrons libres sont attirés par le pôle + et les trous sont attirés par le pôle -.

1.3 La jonction

1.3.1 La jonction élémentaire

Si l'on établit un contact parfait entre un cristal Si P et un cristal Si N, il y a immédiatement mariage entre les électrons libres de la zone N et les trous de la zone P et ce sur une largeur de $1\mu m$ à la zone de contact. Les charges électriques mobiles s'annulent. Il reste les charges électriques des noyaux d'atomes déséquilibrés par cette opération, les atomes sont immobiles. Dans la zone de $1\mu.m$, on voit apparaître un potentiel positif du côté Si

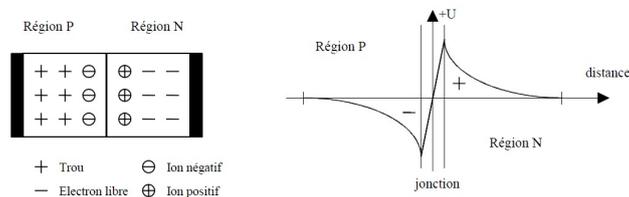


FIGURE 1.5 – La barrière de potentiel repousse les électrons de la zone N et les trous de la zone P.

Cette zone à la jonction s'appelle **BARRIÈRE DE POTENTIEL**. Sur une distance de $1\mu.m$, il n'y a plus de porteurs de charges zone isolée, plus de conduc-

tion possible. La barrière de potentiel repousse les électrons de la zone N et les trous de la zone P.

1.3.2 La jonction polarisé en inverse

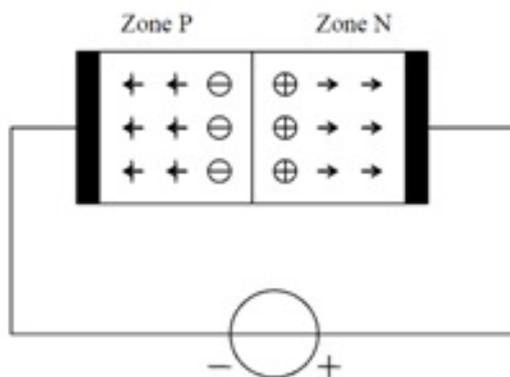


FIGURE 1.6 – La barrière de potentiel s’élargit.

Le pôle - de la source attire les trous (+) et le pôle + attire les électrons. La barrière de potentiel s’élargit. Toute conduction devient impossible, le système est bloqué.

1.3.3 La jonction polarisé en direct

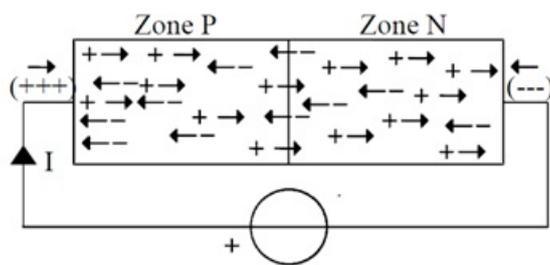


FIGURE 1.7 – La barrière de potentiel se rétrécit.

Le pôle + de la source attire les électrons et apporte des trous dans le circuit. Le pôle - de la source attire les trous et apporte des électrons dans le circuit. Au fur et à mesure que la tension s’élève, la barrière de potentiel se rétrécit. Elle finit par disparaître et le courant peut circuler. On constate dans le silicium :

Début de la conduction vers 0,5 V (fin barrière)

Nette augmentation de la conduction vers 0,6 V

Conduction admise normale à 0,7 V

Chapitre 2

Redressement monophasé

2.1 Objectif

Le redressement est la conversion d'une tension alternative en une tension continue. On utilise un convertisseur alternatif-continu pour alimenter un récepteur en continu à partir du réseau de distribution alternatif.

2.2 La diode

La diode est un semi conducteur en capsulé dans un boitier, 2 électrodes permettent l'accès à la zone dopé et la zone dopé N.

Pour repérer la cathode un anneau en blanc est souvent employé.

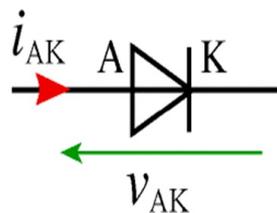


FIGURE 2.1 – Symbole de la diode.

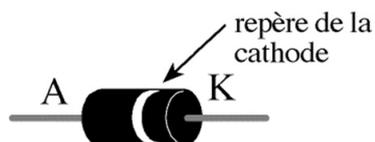


FIGURE 2.2 – Aspect de la diode.

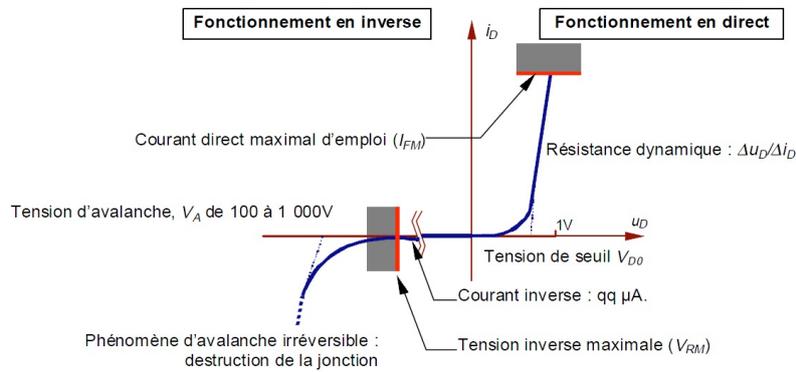


FIGURE 2.3 – Caractéristique statique de la diode

2.2.1 Caractéristique de la diode

La courbe n'est pas une droite alors la diode est un dipôle non linéaire. La tension Useuil est la tension à partir de laquelle la diode devient passante.

2.2.2 Modèle électrique de la diode

En technique de maintenance ou de dépannage on distingue entre 3 modèles de la diode (qui dépendent de la tension et du courant circulant dans le circuit électrique à étudier)

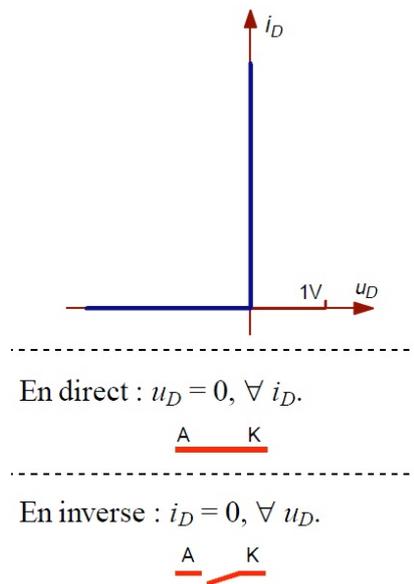


FIGURE 2.4 – Modelé idéal

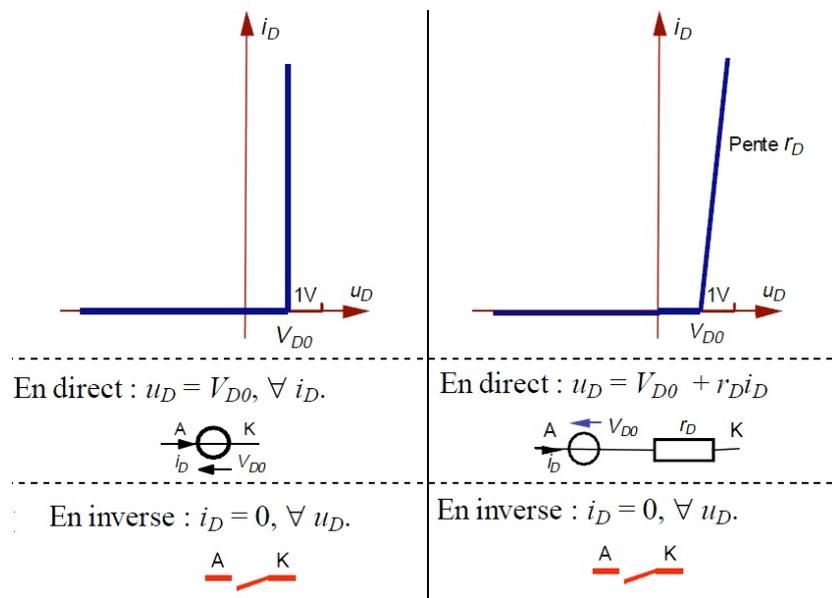


FIGURE 2.5 – Modèle pratique et Modèle réel

Dans la suite du cours, nous allons étudier le redressement double alternance avec un pont à quatre diodes (pont de Graëtz). On trouve ce montage dans les d'appareils électroménagers : chaîne HiFi, ordinateur.

2.3 Redressement double alternance

2.3.1 Principe de fonctionnement

Pour comprendre le fonctionnement d'un pont de Graëtz, on peut le réaliser avec des LED qui s'illuminent lesquelles sont traversées par un courant et un GBF très basse fréquence (0,5 Hz).

On suppose dans la suite que les diodes sont idéal.

Montage

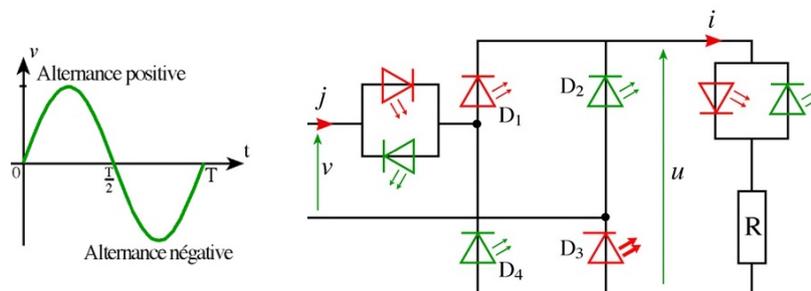


FIGURE 2.6 – Montage détectant le sens du courant

Alternance positive

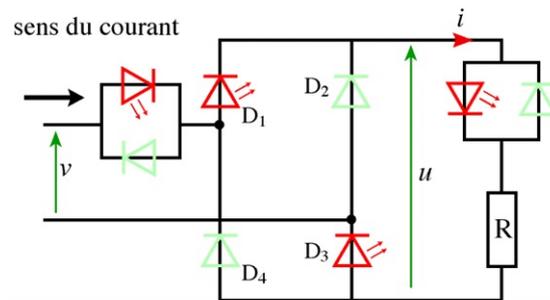


FIGURE 2.7 – Sens du courant dans l’alternance positive

Loi des mailles :

$$v = u \quad (2.1)$$

$$v > 0 \quad (2.2)$$

alors

$$u > 0 \quad (2.3)$$

Alternance négative

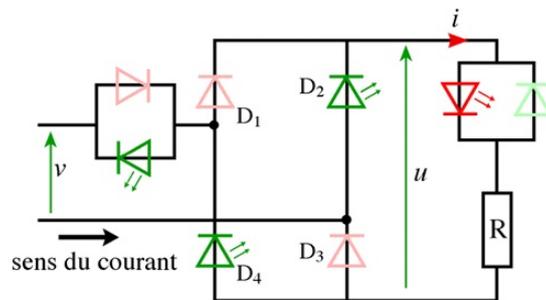


FIGURE 2.8 – Sens du courant dans l’alternance négative

Loi des mailles :

$$v = -u \quad (2.4)$$

$$v < 0 \quad (2.5)$$

alors

$$u > 0 \quad (2.6)$$

2.4 Pont de Graëtz

2.4.1 Schéma

Le pont de Graëtz est constitué de 4 diodes.
 Dans l'étude de ce chapitre, les diodes sont supposées parfaites et donc assimilées à des interrupteurs.
 v est la tension d'entrée du pont.
 u est la tension de sortie.
 R est la charge résistive.

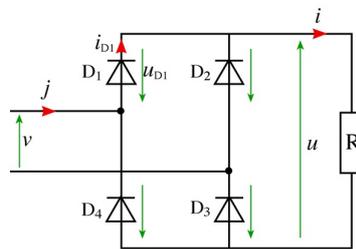


FIGURE 2.9 – Pont de Graëtz

2.4.2 Analyse du fonctionnement

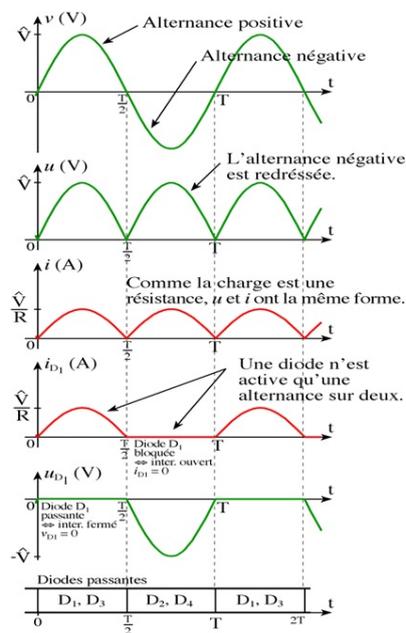


FIGURE 2.10 – Analyse du fonctionnement

Alternance positive

D1 et D3 sont passantes (interrupteurs fermés)

$$uD1 = 0 \quad (2.7)$$

$$uD3 = 0 \quad (2.8)$$

La Loi des mailles :

$$v - uD1 - u - uD3 = 0 \quad (2.9)$$

$$v - u = 0 \quad (2.10)$$

$$u = v > 0 \quad (2.11)$$

La Loi des noeuds :

$$i = iD1 = j = u/R \quad (2.12)$$

Alternance négative

D2 et D4 sont passantes (interrupteurs fermés)

$$u > 0 \quad (2.13)$$

$$uD2 = 0 \quad (2.14)$$

$$uD4 = 0 \quad (2.15)$$

La Loi des mailles :

$$v + uD2 + u + uD3 = 0 \quad (2.16)$$

$$v + u = 0 \quad (2.17)$$

$$u = -v > 0 \quad (2.18)$$

La Loi des noeuds :

$$i = -j = u/R \quad (2.19)$$

Loi des mailles pour D1 :

$$uD1 + uD4 + u = 0 \quad (2.20)$$

alors

$$uD1 = -u = v < 0 \quad (2.21)$$

2.5 Grandeurs caractéristiques

Période

Soit T_s : la période de la tension de sortie et la T_e : période de la tension d'entrée.

$$T_s = T_e/2 \quad (2.22)$$

$$f_s = 2.f_e \quad (2.23)$$

Valeurs instantanée

$$u = \hat{V}.\sin(\omega t) \quad (2.24)$$

Valeurs moyennes

$$\langle u \rangle = \frac{2 \cdot \hat{V}}{\pi} \quad (2.25)$$

$$\langle i \rangle = \frac{\langle u \rangle}{R} = \frac{2 \cdot \hat{V}}{\pi \cdot R} \quad (2.26)$$

Pour retrouver ces résultats il faut intégrer :

$$\langle u \rangle = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \hat{V} \sin(\omega_s t) dt \quad (2.27)$$

La valeur moyenne se mesure avec : un voltmètre numérique sur la position DC (Direct courant)

Valeurs efficaces

$$U = \frac{\hat{V}}{\sqrt{2}} \quad (2.28)$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\hat{V}}{\sqrt{2} \cdot R} \quad (2.29)$$

Pour retrouver ces résultats il faut intégrer :

$$U^2 = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} \hat{V}^2 \sin^2(\omega_s t) dt \quad (2.30)$$

La valeur moyenne se mesure avec : un voltmètre numérique sur la position AC (Alternative courant)

2.6 Filtrage par condensateur

On place en parallèle avec la charge un condensateur de capacité C.

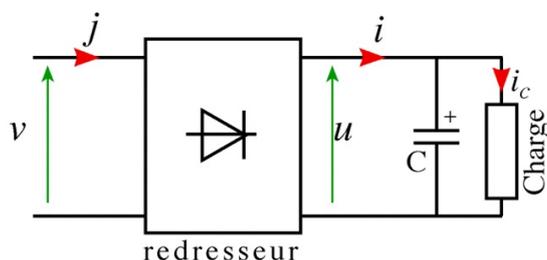


FIGURE 2.11 – Lissage de la tension

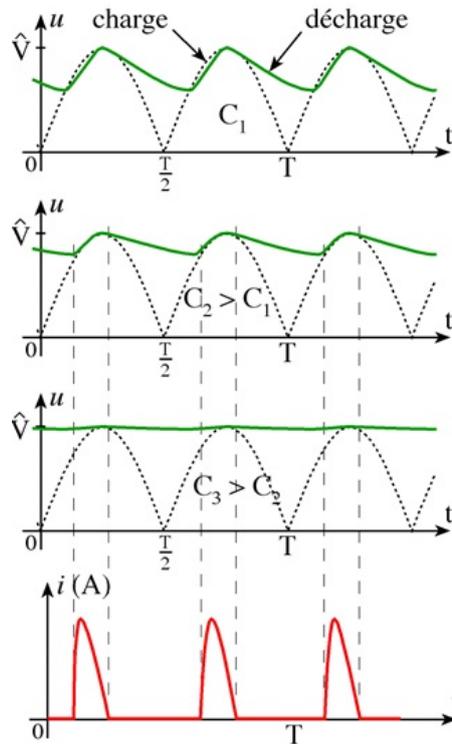


FIGURE 2.12 – Amélioration de la tension redressée

Avantages

On constate que la présence d'un condensateur diminue l'ondulation ΔU de la tension redressée.

$$\Delta U = U_{max} - U_{min} \quad (2.31)$$

La valeur moyenne $\langle u \rangle$ est augmentée. Elle se rapproche de \hat{V} .

Inconvénients

L'apparition de pointes de courant fait que le transformateur et les diodes fonctionnent dans de mauvaises conditions.

Pour cette raison, ce mode de fonctionnement n'est utilisé qu'avec des montages fournissant des courants faibles tels que le petit électroménager.

Remarque :

si la capacité du condensateur est suffisante ($RC \gg T$), l'ondulation ΔU devient négligeable et $\Delta U = \hat{V}$.

2.7 Débit sur charge active R, E

Considérons une charge R,E. Il peut s'agir par exemple d'un moteur à courant continu ou d'une batterie à recharger. Observons à l'oscilloscope le courant i et la tension u .

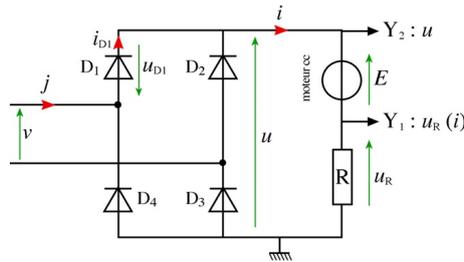


FIGURE 2.13 – Débit sur charge active

La Loi des mailles :

$$u = E_0 + R.i \quad (2.32)$$

ce qui donne :

$$i = \frac{u - E_0}{R} \quad (2.33)$$

Analyse de la loi des mailles :

Si $u < E_0$, nous trouvons $i < 0$. Cette situation est impossible car les diodes se bloquent.

Finalement : si $u > E_0$, alors les diodes conduisent ($i > 0$); si $u < E_0$, alors les diodes sont bloquées; ce qui entraîne $i = 0$.

Exemple d'application du redressement

Réalisation d'une alimentation continue stabilisée avec un transformateur, un pont de diode et un condensateur de lissage de la tension et régulateur intégré.

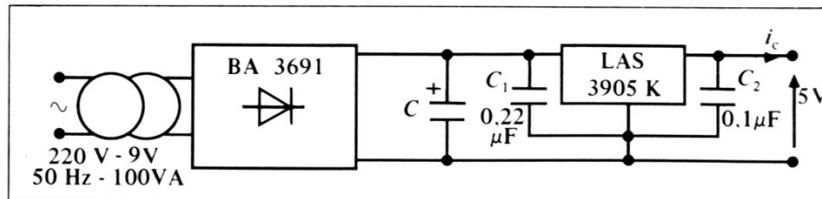


FIGURE 2.14 – Application pratique de redressement

Chapitre 3

Le Transistor bipolaire

3.1 Introduction

En électronique, un tel composant est intéressant, car il va permettre d'amplifier un signal, et de commander des actionneurs requérant de la puissance (haut parleurs moteurs, etc) avec des signaux de faible niveau issus de capteurs (microphone, sonde de température, de pression,). Le transistor à jonction va permettre de remplir (entre autres) cette fonction en électronique.

3.2 Description et symbole

Le transistor bipolaire, encore appelé transistor à jonction est formé par la succession de 3 semi-conducteurs N,Pet N (transistor NPN) et P,N et P (transistor PNP). Le transistor est formé de 2 jonction PN.

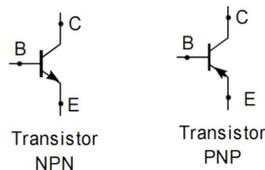


FIGURE 3.1 – Symbole du transistor.

3.3 Effet transistor

Considérons un transistor NPN.

La tension V_{BE} positive, polarise la jonction base-émetteur du transistor en direct, alors que la tension V_{CB} polarise la jonction collecteur-base en inverse!

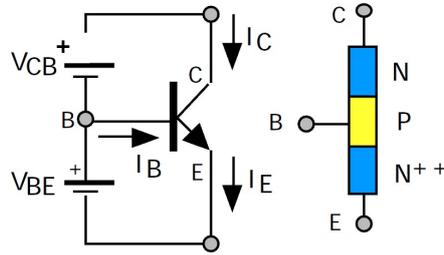


FIGURE 3.2 – Effet transistor

Émetteur (Zone N++) : fortement dopé c'est à dire le nombre d'électron est très important.

Base (Zone P) : faiblement dopé et très mince là ou le nombre de trous est minimale.

Collecteur (Zone N) : Moyennement dopé, le nombre d'électron libre est important.

Interprétation du fonctionnement :

Lorsque la jonction BE est polarisé en direct et la jonction CB en inverse, les électrons libres de l'émetteur sortent accélérés vers la base et pour la plupart la traverse rapidement pour être capté par le potentiel positif du collecteur. Cet effet "appelé effet transistor" a pour conséquence de contrôler à l'aide de courant de base I_B (très faible), un courant de collecteur I_C beaucoup plus important.

3.4 Relations fondamentales d'un transistor

Pour la figure 3.2, on a :

$$I_C = \beta \cdot I_B \tag{3.1}$$

β : gain en courant , $\beta \gg 1$

$$I_E = I_C + I_B \tag{3.2}$$

or $I_C = \beta \cdot I_B$ donc $I_E = \beta \cdot I_B + I_B \Rightarrow I_E = (1 + \beta) \cdot I_B$ par suite

$$I_E \simeq \beta \cdot I_B = I_C \tag{3.3}$$

3.5 Réseaux de caractéristique

Pour caractériser complètement le fonctionnement d'un transistor, il faut déterminer 6 grandeurs I_C, I_B, I_E et V_{CE}, V_{BE}, V_{BC}
or

$$I_C + I_B - I_E = 0 \tag{3.4}$$

et

$$V_{CE} - V_{BE} - V_{BC} = 0 \tag{3.5}$$

⇒ il ne reste plus que 4 grandeurs indépendantes dont une électrode est commune à l'entrée et à la sortie.

Trois montages sont à envisager :

- base commune ⇒ utilisé en haute fréquence.
- collecteur commun ⇒ utilisé en adaptation d'impédance.
- Emetteur commun ⇒ utilisé en amplification est c'est le montage le plus utilisé.

3.5.1 Le montage émetteur commun

Le montage est présenté par la figure suivante :

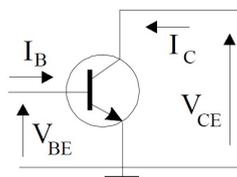


FIGURE 3.3 – Montage émetteur commun

Les bornes d'entrée du tripôle sont la base et l'émetteur ; les grandeurs d'entrée sont : I_B et V_{BE} .

La sortie se fait entre le collecteur et l'émetteur ; les grandeurs correspondantes sont : I_C et V_{CE} .

On utilise les paramètres hybrides dont l'intérêt sera justifié après la description des caractéristiques.

$$\begin{bmatrix} v_{BE} \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_B \\ v_{CE} \end{bmatrix}$$

FIGURE 3.4 – Matrice hybride

3.5.2 Polarisation du transistor

La polarisation a pour rôle de placer le point de fonctionnement (point de repos) dans une zone où les caractéristiques du transistor sont linéaires.

Exemple de Calcul : polarisation d'un transistor NPN émetteur commun

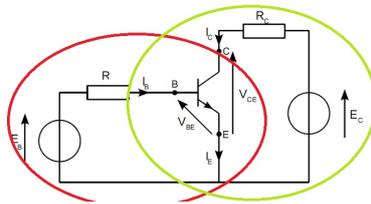


FIGURE 3.5 – Polarisation d'un transistor NPN émetteur commun

Ce montage comporte deux parties :

- Le réseau d'entrée : E_B, R_B, I_B, V_{BE}
- Le réseau de sortie : E_C, R_C, I_C, V_{CE}

Appliquons la loi des mailles sur les deux réseaux :

- Le réseau d'entrée :
Maille : $E_B - R_B \cdot I_B - V_{BE} = 0$

$$I_B = \frac{E_B - V_{BE}}{R_B} \quad (3.6)$$

- Le réseau de sortie :
Maille $E_C - R_C \cdot I_C - V_{CE} = 0$

$$I_C = \frac{E_C - V_{CE}}{R_C} \quad (3.7)$$

Avec le montage adopté , on relève les caractéristiques du transistor NPN. Les sources de tension sont donc variables.

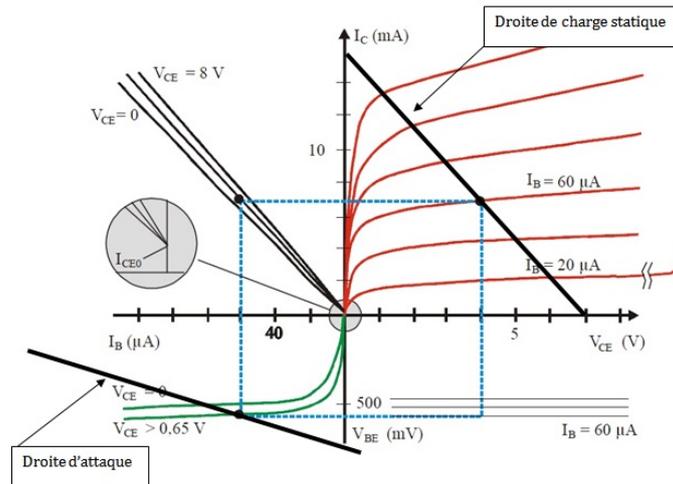


FIGURE 3.6 – Réseaux de caractéristique de fonctionnement du transistor

Les tensions et les courants appliqués ou composant sont toujours positifs. Les caractéristiques utilisent cette propriété en traçant 4 axes, un par grandeur étudiée : I_B, I_C, V_{BE} et V_{CE} .

Les autres sont secondaires, mais peuvent être déduites de ces 4 là. On distingue 4 réseaux de courbes :

- Caractéristiques d'entrée, $I_B = f(V_{BE})$ paramétrée par V_{CE} , caractéristique d'une diode en direct. La tension V_{BE} est donc une tension de seuil (0.7V)
- Caractéristiques de sortie, $I_C = f(V_{CE})$ paramétrée par I_B
- Caractéristiques de transfert en courant, $I_C = f(I_B)$ paramétrée par V_{CE} traduit le fait que les courants I_B et I_C sont proportionnels
- Caractéristiques de transfert en tension, $V_{CE} = f(V_{BE})$ maintenue constante.

De l'exploitation des caractéristiques précédentes, on peut distinguer les deux applications du transistor :

- les courants I_C et I_B sont proportionnels, **c'est le domaine du fonctionnement linéaire.**
- l'autre cas apparaît lorsque l'on augmente I_B . La relation de linéarité disparaît pour faire place à la saturation du courant de collecteur, c'est **le domaine du fonctionnement non linéaire saturé ou tout ou rien.**

En entrée :

La droite d'attaque est la droite du charge du générateur d'entrée (relié à la base)

Le point d'entrée est définie par intersection de la caractéristique d'entrée du transistor avec la droite d'attaque.

$$V_{BE} = E_B - R_B \cdot I_B \quad (3.8)$$

La connaissance du point d'entrée (I_{BF}, V_{BEF}) permet la détermination via le réseaux de transfert en courant du courant de sortie I_{CF}

En sortie :

En sortie, l'équation de la droite de charge du générateur E_C qui débite dans RC et dans l'espace collecteur émetteur du transistor est : La tension V_{BB} est égale à

3.6 Réalisation pratique de la polarisation

Dans la pratique, la polarisation d'un transistor nécessite un seul générateur, nous distinguons alors plusieurs montages, à savoir :

- Polarisation par résistance de base
- Polarisation par réaction d'émetteur
- Polarisation par réaction de collecteur
- Par pont de base et résistance d'émetteur

Ce dernier fera l'objet de la suite du cours.

3.6.1 Par pont de base et résistance d'émetteur

Pour rendre indépendant le courant collecteur des variations du gain, on utilise un diviseur de tension (pont de base).

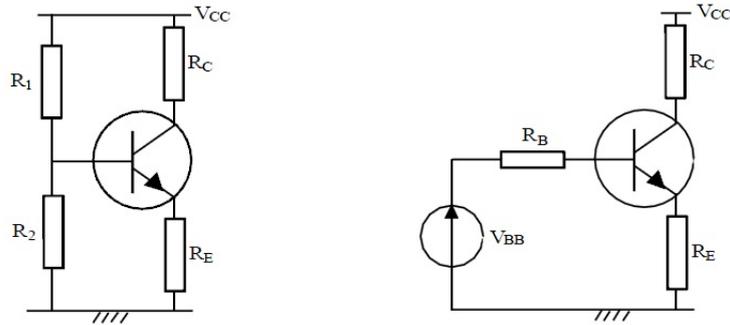


FIGURE 3.7 – Polarisation par diviseur de tension

La tension V_{BB} est égale à :

$$V_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{CC} \quad (3.9)$$

En conséquence, le courant I_E est égal à :

$$I_E = \frac{V_{TH} - V_{BE}}{R_E + \frac{R_B}{\beta}} \quad (3.10)$$

3.7 Transistor en régime variable

3.7.1 Schéma équivalent du transistor en dynamique

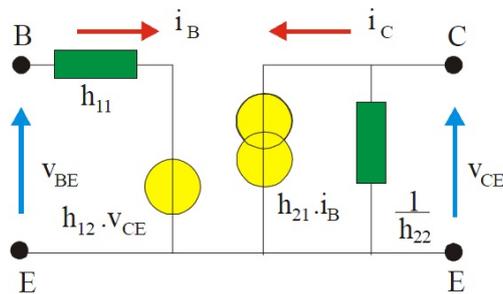


FIGURE 3.8 – Schéma équivalent du transistor

- $h_{11} = \frac{V_{BE}}{I_B}$ à $V_{CE} = \text{Constante}$. C'est la résistance d'entrée du transistor. C'est aussi la pente de la caractéristique d'entrée.

- $h_{21} = \frac{I_C}{I_B}$ à $V_{CE} = Constante$. C'est le gain en courant du transistor. Il est très voisin de β qui est la pente de la caractéristique de transfert en courant.
- $h_{22} = \frac{I_C}{V_{CE}}$ à $I_B = Constante$. C'est l'admittance de sortie du transistor. Elle est en général faible et correspond à la pente des caractéristiques du réseau de sortie.
- $h_{12} = \frac{V_{BE}}{V_{CE}}$ à $I_B = Constante$. C'est la pente des caractéristiques du réseau de transfert en tension. Ce paramètre étant voisin de zéro.

Le schéma devient :

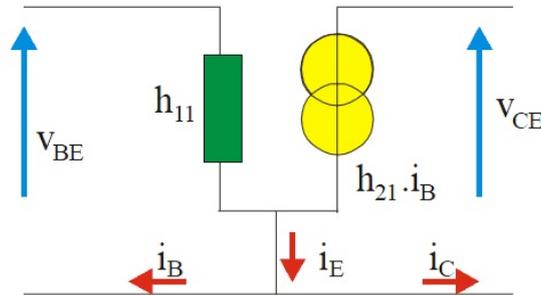


FIGURE 3.9 – Schéma équivalent du transistor simplifié

3.7.2 Schéma équivalent d'un amplificateur à transistor

Le transistor est placé par la polarisation dans une zone où les caractéristiques sont linéaires I_{BF} , I_{CF} , V_{BEF} et V_{CEF} .

Si on applique sur la base un signal variable, ceci va provoquer des variations i_B du courant autour du courant de base I_{BF} .

Ces variations sont amplifiées par le transistor et son courant de sortie I_C présente des variations i_C par rapport à la valeur au repos I_{CF} .

Le générateur continu V_{CC} permet la polarisation. C'est ainsi ce dernier qui fournira l'énergie nécessaire à l'amplification du signal.

On choisit comme amplificateur à étudier 'l'amplificateur à émetteur commun'

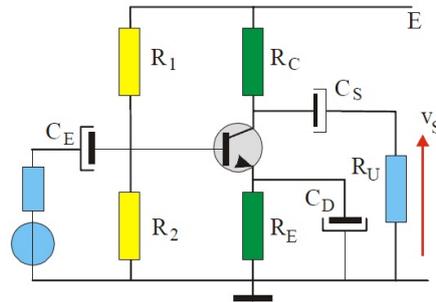


FIGURE 3.10 – Schéma de principe de l'amplificateur EC

La résistance d'émetteur R_E introduit une contre-réaction en courant continu pour la stabilisation thermique du transistor. Un condensateur de découplage C_D est placé en parallèle sur la résistance d'émetteur R_E et permet de rendre l'influence de celle-ci négligeable pour les signaux variables. Pour étudier ce montage :

- les condensateurs seront remplacés par des impédances infinies ($\frac{1}{c\omega} \rightarrow \infty$) pour polariser le transistor, c'est à dire qu'on se retrouve avec le fonctionnement en régime continu.
- les condensateurs seront remplacés par des court circuit pour étudier l'amplificateur en régime dynamique .

Ainsi le schéma équivalent en régime dynamique de l'amplificateur ainsi que le transistor est donné par la figure suivante :

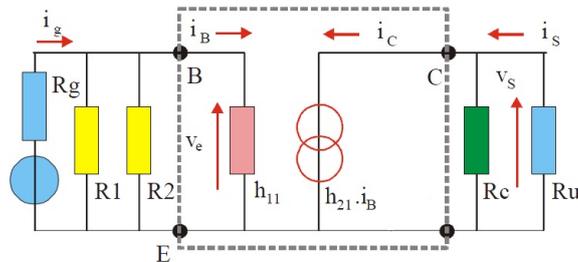


FIGURE 3.11 – Schéma équivalent de l'amplificateur en régime dynamique

L'étude de l'amplificateur consiste à déterminer les trois variables suivantes :

- Impédance d'entrée Z_E : Comme $V_E = h_{11} \cdot i_b$, la résistance du transistor seul est : $Z_E = h_{11}$. L'examen du schéma équivalent montre que celle du montage est $Z_E = R_1 // R_2 // h_{11}$
- Impédance de sortie Z_S : $Z_S = R_2 // h_{22}^{-1}$
- Gain en tension A_V : $A_V = \frac{V_S}{V_E} = -\frac{h_{21} \cdot Z_S}{h_{11}}$

Chapitre 4

L'amplificateur opérationnel

4.1 Généralités

L'amplificateur Opérationnel est un circuit intégré multi broches dont les paramètres dynamiques principaux se rapprochent d'un amplificateur idéal. Un amplificateur idéal est caractérisé par : Gain en tension infini Résistance d'entrée infinie Résistance de sortie nulle. L'amplificateur opérationnel provient du fait qu'il est utilisé avant l'apparition des circuits intégrés dans les ordinateurs analogiques pour effectuer les opérations mathématiques addition , soustraction , dérivation , intégral sur des tensions et des courants. :

4.2 Présentation et symboles

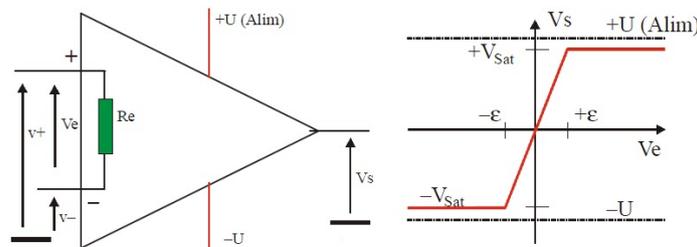


FIGURE 4.1 – Symbole de l'AO et caractéristique

- V^+ = entrée non inverseuse
- V^- = entrée inverseuse
- A_0 = gain en tension très grand $10^5 \rightarrow 10^7$
- R_e = impédance d'entrée $\gg R_e = 10^5 \rightarrow 10^{12} \Omega$
- R_s = impédance de sortie $\gg R_s = 10 \rightarrow 500 \Omega$

La saturation des amplificateurs opérationnels :

La tension de sortie peut varier entre les valeurs extrêmes $+V_{sat}$ et $-V_{sat}$ (tension de saturation) qui sont légèrement inférieures aux tensions d'alimentation.

Le gain étant très grand, la saturation de la sortie est obtenue pour des tensions d'entrée très faibles.

avec : $V_{sat} = 12V$ et $A_0 = 10^5$ et $\varepsilon = V^+ - V^- = 0,12mV$

4.3 Montages fondamentaux

4.3.1 Montage inverseur idéal

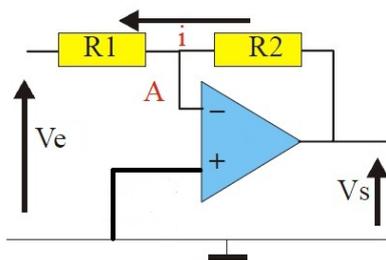


FIGURE 4.2 – Montage inverseur

AOP supposé idéal $\Rightarrow i^+ = i^- = 0$

$$i^- = 0 = \frac{V_e}{R_1} + \frac{V_s}{R_2} \quad (4.1)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.2)$$

4.3.2 Montage non inverseur

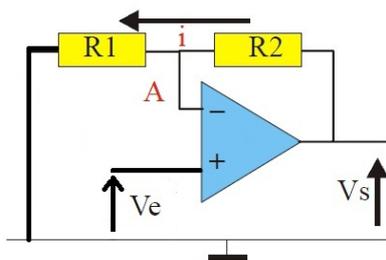


FIGURE 4.3 – PMontage non inverseur

AOP supposé idéal $\Rightarrow i^+ = i^- = 0 \Rightarrow$ le courant qui traverse R_1 est le même courant qui traverse R_2

$V^+ = V^- = V_e$

$$V_e = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_s \quad (4.3)$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (4.4)$$

4.3.3 Montage suiveur

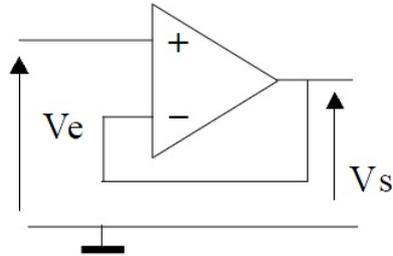


FIGURE 4.4 – Montage suiveur

4.4 Applications des amplificateurs opérationnels

4.4.1 Montage sommateur

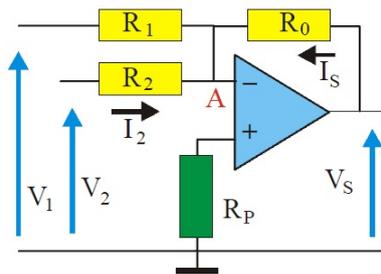


FIGURE 4.5 – Montage sommateur

on a

$$I_s = \frac{(V_s - V_A)}{R_0} \quad (4.5)$$

$$I_1 = \frac{(V_1 - V_A)}{R_1} \quad (4.6)$$

$$I_2 = \frac{(V_2 - V_A)}{R_2} \quad (4.7)$$

or $\sum I_A = 0$ et $V_A = 0$

$$\frac{V_S}{R_0} = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right) \quad (4.8)$$

$$V_S = -R_0 \cdot \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2}\right) \quad (4.9)$$

On choisissant $R_1 = R_2 = R_0$, on obtient $V_S = -(V_1 + V_2)$

4.4.2 Montage soustracteur

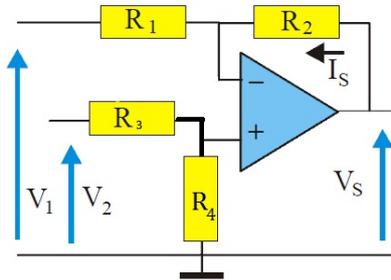


FIGURE 4.6 – Montage soustracteur

$$V^- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_S \quad (4.10)$$

$$V^+ = \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot V_2 \quad (4.11)$$

Or $V^+ = V^-$ Donc

$$V_S = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_4}{R_1} \cdot V_2 - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_1 \quad (4.12)$$

Si $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ Alors

$$V_S = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1) \quad (4.13)$$

4.4.3 Montage intégrateur idéal

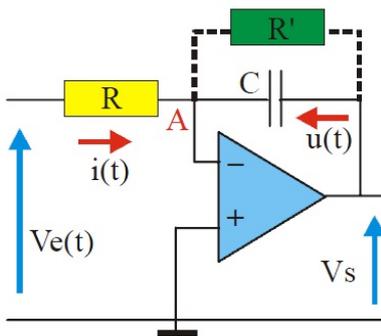


FIGURE 4.7 – Montage intégrateur

Le signal d'entrée est $V_e(t)$. Dans le modèle idéal, $V_A = 0$, donc $i(t) = \frac{V_e(t)}{R}$
 Le courant dans le condensateur est : $i(t) = -C \cdot \frac{dV_s}{dt}$

$$\frac{dV_s}{dt} = -\frac{1}{RC} \cdot V_e \quad (4.14)$$

Par intégration on tire :

$$V_s = K - \frac{1}{RC} \cdot \int_0^t V_e(t) dt \quad (4.15)$$

4.4.4 Montage dérivateur idéal

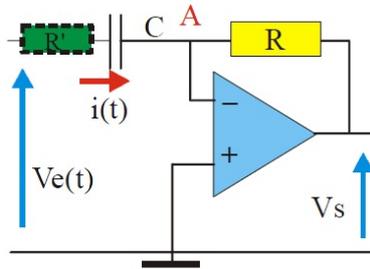


FIGURE 4.8 – Montage dérivateur

Par permutation du condensateur et de la résistance, on obtient un dérivateur.

Le courant dans le condensateur est :

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = C \cdot \frac{dV_e}{dt} \quad (4.16)$$

C'est aussi le courant qui circule dans la résistance R.

$$V_s(t) = -R \cdot i(t) \quad (4.17)$$

donc

$$V_s(t) = -RC \cdot i(t) \cdot \frac{dV_e}{dt} \quad (4.18)$$

Remarque

L'utilisation du théorème de Millman permet souvent d'obtenir rapidement la solution des problèmes relatifs aux amplificateurs idéaux.

Bibliographie

- [1] Thomas L. Floyd *Electronique : composants et systèmes d'application*,
Dunod, 2000
- [2] Alberto P. Malvino *Principes d'électronique*,
McGraw-Hill, 1991
- [3] Bogdan Grabowski, Christian Ripoll, *Aide mémoire Électronique*,
Dunod
- [4] D. Bauer, R. Bougeois, M. Jakubowicz *Memotech, sciences de l'ingénieur*,
Casteilla, 2003