

CHAPITRE 2: LA DIODE

I. Définitions:

I.1. Semiconducteur:

↳ Un semiconducteur est un matériau qui présente une conductivité intermédiaire entre celle d'un métal (conducteur) et celle d'un isolant. Cette conductivité, contrairement aux conducteurs courants, dépend beaucoup de la température et augmente avec celle-ci. Exemples: Si, Ge, CoAs ...

I.2. Semiconducteur intrinsèque:

↳ Un semiconducteur est dit "intrinsèque" lorsqu'il est à l'état pur.

I.3. Semiconducteur extrinsèque:

↳ on peut augmenter la conduction d'un semiconducteur intrinsèque en lui ajoutant un très faible taux d'impureté. Cette opération s'appelle "dopage". on constitue alors un semiconducteur extrinsèque.

↳ Suivant la nature de l'impureté introduite, on peut obtenir soit un matériau de type N ou un matériau de type P.

I.3.1. Semiconducteur de type N:

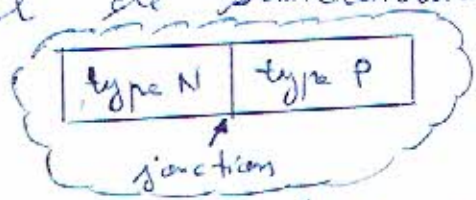
↳ on obtient un semiconducteur de type N en dopant le silicium avec des atomes possédant 5 électrons de valence (phosphore (P), Arsenic (As), ...). Dans un semiconducteur de type N, les électrons (charges négatives) constituent les porteurs majoritaires.

I.3.2. Semiconducteur de type P:

- ↳ on obtient un semiconducteur de type P en injectant dans le silicium des atomes qui possèdent trois électrons de valence (Bore (B), Indium (In) ...).
- ↳ Dans un semiconducteur de type P les trous (charges positives) constituent les porteurs majoritaires.

I.4: Jonction PN:

↳ Une jonction PN est constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents (N et P) d'un même monocristal de semiconducteur.



↳ La jonction PN est à la base de différents types de composants (diodes, transistors, thyristors ...).

II. Fonctionnement d'une diode à jonction PN:

II.1. Analyse en régime statique:

II.1.1. Caractéristique courant-tension [I(V)]:

↳ pour mesurer le courant d'une jonction PN, des contacts métalliques doivent être pris sur les côtés N et P. on obtient un composant appelé diode. Elle est symbolisée dans les circuits électriques par:



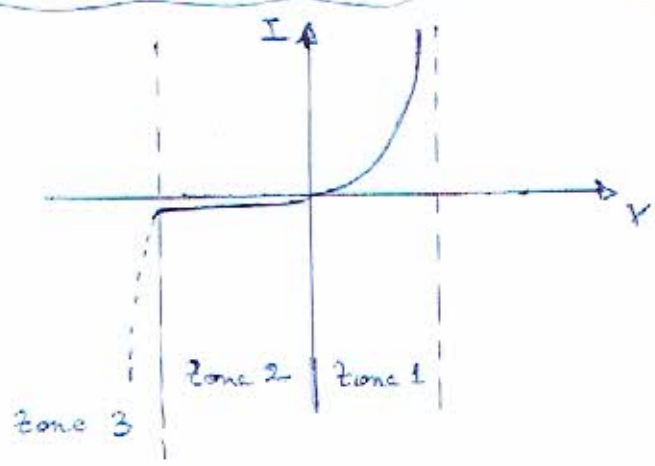
La caractéristique $I(V)$, d'une diode et la courbe représentant la variation du courant I traversant la jonction en fonction de la tension V qui lui est appliquée. Elle est obtenue à partir de l'équation suivante (pour les zones 1 et 2):

$$I = I_{sat} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) = I_{sat} \left(e^{\frac{V}{U_T}} - 1 \right) \quad (*)$$

$U_T = \frac{kT}{q}$, $U_T \approx 26 \text{ mV à } 300^\circ\text{K}$, I_s : courant de saturation

$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K} = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ (constante de Boltzmann)

$q = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ (charge de l'électron) T : température (K)



pour les zones 1 et 2:

En polarisation directe, $V > 0$ (zone 1), dès que $V > U_T$:

$$I \approx I_s e^{\frac{V}{U_T}} \rightarrow \text{la diode est passante.}$$

En polarisation inverse, $V < 0$ (zone 2), dès que $V < U_T$:

$$I \approx -I_{sat}$$

le courant de saturation I_{sat} est très faible, on dit que la diode est bloquée.

La zone 3 est la zone d'avalanche.

Le courant de saturation dépend essentiellement de la température. son démontre que le courant double

quand la température augmente de 6 degrés pour le silicium. Il double tous les 10 degrés dans le cas du Germanium.

Remarque:

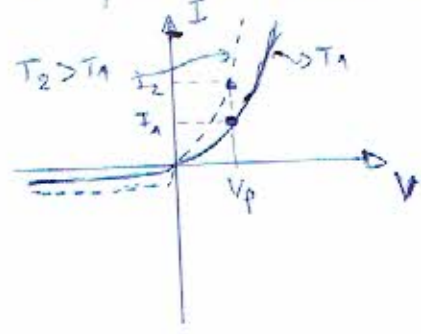
En pratique les jonctions PN présentent des caractéristiques légèrement différentes de celle donnée par l'équation

$$I = I_{sat} \left(e^{\frac{V}{nV_i}} - 1 \right)$$

n : facteur d'idéalité $\rightarrow 1 \leq n \leq 2$

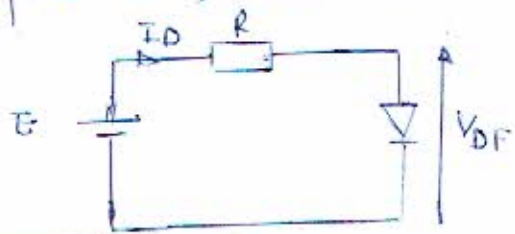
Influence de la température:

L'élévation de la température conduit à une augmentation du courant inverse ainsi que la courant direct pour une même valeur de polarisation V.



II. 1.2. point de fonctionnement, droite de charge:

soit le circuit simple à diode suivant:



$$E = R I_D + V_{DF}$$

(V_{DF} : tension directe appliquée à la diode)

$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{V_{DF}}{R}$$

Cette équation est celle de la droite de charge.

peut déterminer le point de fonctionnement ou point de repos du circuit, en résolvant cette équation. Elle peut être résolue numériquement ou graphiquement.

A) Méthode numérique:

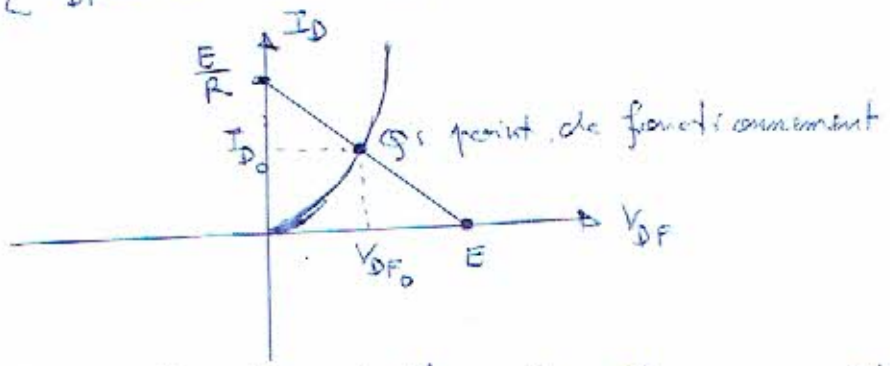
$$I_D = I_{sat} \left(e^{\frac{V_{DF}}{V_T}} - 1 \right) \rightarrow E = R \cdot I_{sat} \left(e^{\frac{V_{DF}}{V_T}} - 1 \right) + V_{DF}$$

cette équation ne contient qu'une inconnue V_{DF} . Cependant c'est une équation transcendante qui ne peut être résolue directement. Une méthode pour résoudre cette équation est celle des itérations successives. Une fois V_{DF} déterminée, on en déduit I_D .

B) Méthode graphique:

On trace la caractéristique $I_D(V_{DF})$ et la droite d'équation:

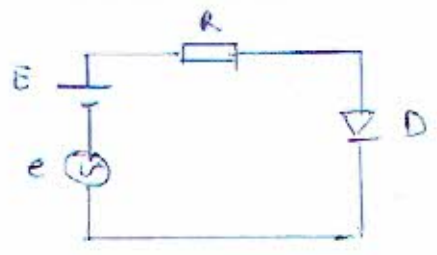
$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{V_{DF}}{R} \cdot \begin{cases} V_{DF} = 0 \rightarrow I_D = \frac{E}{R} \\ V_{DF} = E \rightarrow I_D = 0 \end{cases}$$



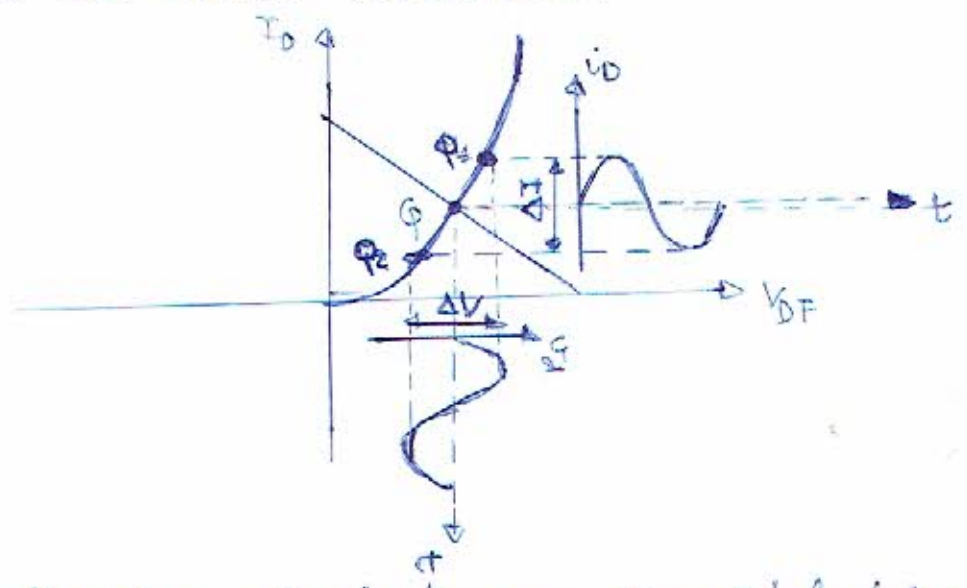
Le point d'intersection de la droite de charge avec la caractéristique $I_D(V_{DF})$ [A] est appelé point de fonctionnement ou point de polarisation ou point de repos.

Ex. 2. régime dynamique (variable):

Voit le montage suivant, en une tension de faible amplitude $e = E_0 \sin \omega t$ est superposée à une tension continue E_0 .



Si $e = 0$, la diode est polarisée au point $Q(V_{DF0}, I_{D0})$ par la source E à travers R . Si $e \neq 0$, la tension alternative se superpose à la tension continue.



À la variation alternative de la tension sinusoïdale (e) correspond un déplacement du point de fonctionnement sur la droite de charge entre les deux points Q_1 et Q_2 . Il en résulte des variations $\Delta V = v$ et $\Delta I = i$ autour du point Q .

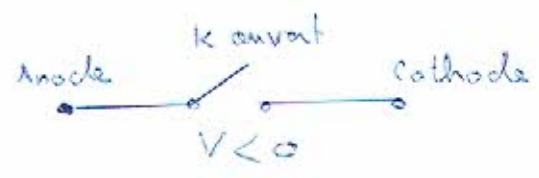
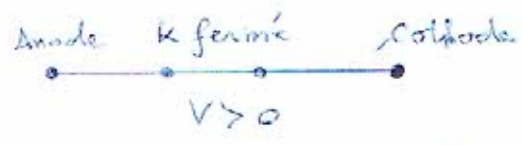
La quantité $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ est la pente de la caractéristique $I(V)$ au point Q . $r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ → résistance dynamique ou résistance différentielle de la diode.

II.3. Schémas équivalents à une diode:

II.3.1. Diode idéale:

Une diode idéale se comporte comme un interrupteur ouvert quand la diode est polarisée en inverse et fermé quand elle est polarisée en direct.

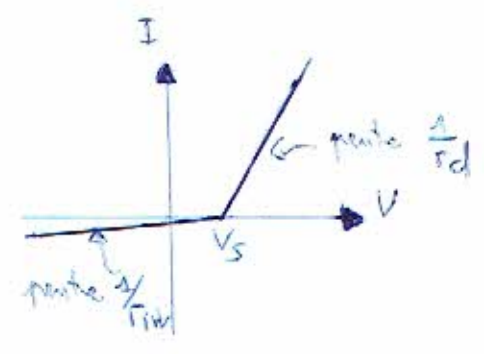




Le modèle de la diode idéale est le plus simple, mais le moins précis. Il est utilisé pour des estimations rapides et pour des analyses de circuits complexes.

II.3.2. Diode réelle :

L'approximation la plus proche de la diode réelle consiste à prendre en compte les résistances dynamiques de la diode (r_d et r_{inv}) et la barrière de potentiel V_s .



En direct : $\left\{ \begin{array}{l} \text{et } (V_{AK} > V_s) \end{array} \right.$ V_s : tension de seuil

En inverse : $\left\{ \begin{array}{l} \text{car } (V_{AK} < V_s) \end{array} \right.$ r_{inv} (très grande)

Le modèle de la diode réelle représente une très bonne approximation linéaire de la caractéristique d'une diode. Il est plus précis que le modèle de la diode idéale, mais plus complexe.

III. Les circuits à diodes :

III.1. Redressement :

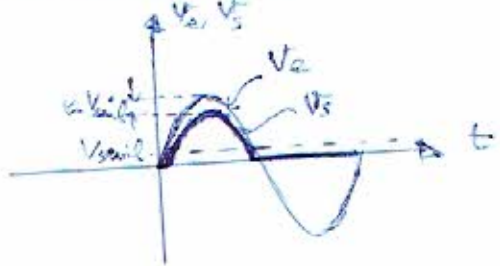
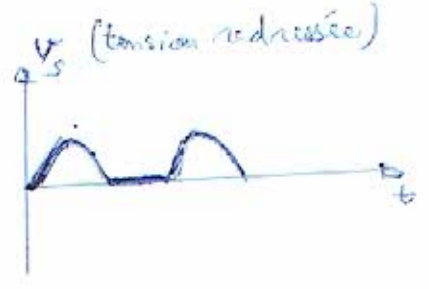
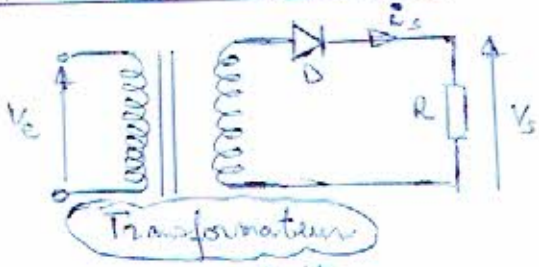
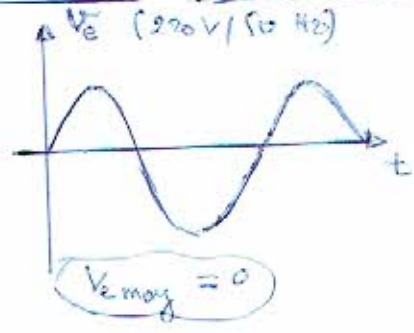
Le fonctionnement des montages électroniques nécessitent souvent des sources d'alimentation continues. Elles-ci peuvent être constituées par des batteries mais pour des

installations fixes, elles sont obtenues d'une manière plus commode à partir du réseau de distribution de l'énergie (secteur alternatif 220V (eff) / 50 Hz). Il faut alors redresser, filtrer, et stabiliser la tension fournie.

↳ Le redressement a pour but l'obtention d'une tension continue à partir d'une tension sinusoïdale. On utilise pour ce faire une diode qui en déformant le signal d'entrée (suppression d'une des deux alternances par exemple), fait apparaître dans le signal de sortie une composante continue.

↳ Afin d'obtenir le niveau de tension désiré, il est le plus souvent nécessaire d'intercaler entre le signal issu du secteur et le montage un transformateur abaisseur de tension.

III. 1. 1. Redressement mono-alternance :



V_s moy ?

$$V_{moy} = \frac{1}{T_0} \int_0^T v(t) dt$$

$$V_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_s(t) dt$$

$$V_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V_{smax} \sin \omega t dt$$

$$V_{smoy} = \frac{V_{smax}}{\pi}$$

I_{smoy}?

$$I_{smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt \rightarrow I_{smoy} = \frac{I_{smax}}{\pi}$$

V_{eff}?

$$V_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt$$

$$V_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_s^2(t) dt \rightarrow V_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v_{smax}^2 \sin^2 \omega t dt$$

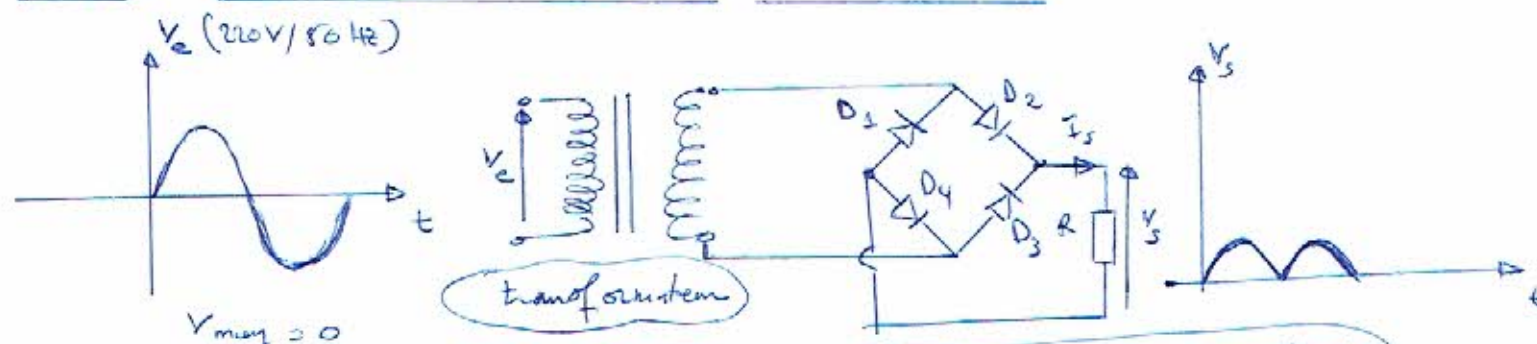
$$V_{eff} = \frac{V_{smax}}{\sqrt{2}}$$

I_{s eff}?

$$I_{s eff} = \frac{I_{smax}}{\sqrt{2}}$$

Remarque: Dans un redressement mono-alternance, la fréquence du signal de sortie est la même que celle du signal d'entrée.

II. 1.2. Redressement double alternance:



Redressement double alternance à pont de diodes - pont de Grätz -

- ↳ Alternance positive: D₂ et D₄ conduisent, D₁ et D₃ bloquées.
- ↳ Alternance négative: D₁ et D₃ conduisent, D₂ et D₄ bloquées.

$$\begin{cases} \text{Alt (+)}: v_s \approx v_e - 2V_{seuil} \\ \text{Alt (-)}: v_s \approx -v_e - 2V_{seuil} \end{cases}$$

- ↳ Le courant dans la résistance de charge R prend le même sens pour les deux alternances.
- ↳ La fréquence du signal redressé est égale au double de celle du signal d'entrée.

$V_{s\text{ moy}}$? , $I_{s\text{ moy}}$:

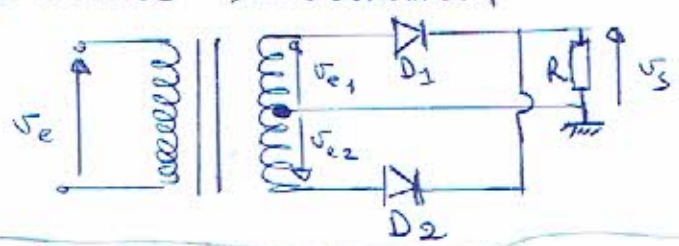
$$V_{s\text{ moy}} = \frac{2V_{s\text{ max}}}{\pi} , I_{s\text{ moy}} = \frac{2I_{s\text{ max}}}{\pi}$$

$V_{s\text{ eff}}$? , $I_{s\text{ eff}}$:

$$V_{s\text{ eff}} = \frac{V_{s\text{ max}}}{\sqrt{2}} , I_{s\text{ eff}} = \frac{I_{s\text{ max}}}{\sqrt{2}}$$

Remarque :

- ↳ on peut utiliser le montage suivant pour faire un redressement double alternance :



Redressement double alternance avec un transformateur à point milieu

III.1.3. Taux d'ondulation et facteur de forme d'un signal redressé :

- Le but recherché par le redressement est de transformer un signal alternatif (signes + et -) en un signal continu (un seul signe). Le signal redressé n'est pas constant, il comporte une composante ondulée. Pour mesurer l'importance de cette composante variable, on définit un paramètre τ appelé taux d'ondulation.

$$\tau = \frac{\text{valeur efficace de l'ondulation}}{\text{valeur moyenne}} \rightarrow \tau = \frac{I_{\text{eff oncl}}}{I_{\text{moy}}}$$

on définit aussi un facteur de forme F :

$$F = \frac{\text{valeur efficace}}{\text{valeur moyenne}} \rightarrow F = \frac{I_{\text{eff}}}{I_{\text{moy}}}$$

$$I_{\text{eff}}^2 = I_{\text{moy}}^2 + I_{\text{eff oncl}}^2 \rightarrow F^2 = 1 + \tau^2$$

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

En pratique pour mesurer τ , on mesure I_{moy} à l'aide d'un ampèremètre électromagnétique, et I_{eff} à l'aide d'un ampèremètre électrodynamique. On en déduit la valeur de F ce qui nous permet de calculer τ .

• Calcul de F et τ pour un redressement mono-alternance :

$$\begin{cases} I_{\text{seff}} = \frac{I_{\text{smax}}}{2} \\ I_{\text{smoy}} = \frac{I_{\text{smax}}}{\pi} \end{cases} \Rightarrow F = \frac{\frac{I_{\text{smax}}}{2}}{\frac{I_{\text{smax}}}{\pi}} = \frac{\pi}{2} = 1,57$$

$$\tau = \sqrt{(1,57)^2 - 1} = 1,21$$

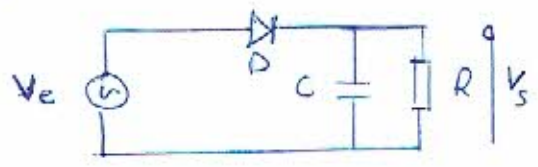
• Calcul de F et τ pour un redressement double alternance :

$$\begin{cases} I_{\text{seff}} = \frac{I_{\text{smax}}}{\sqrt{2}} \\ I_{\text{smoy}} = \frac{2 I_{\text{smax}}}{\pi} \end{cases} \Rightarrow F = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

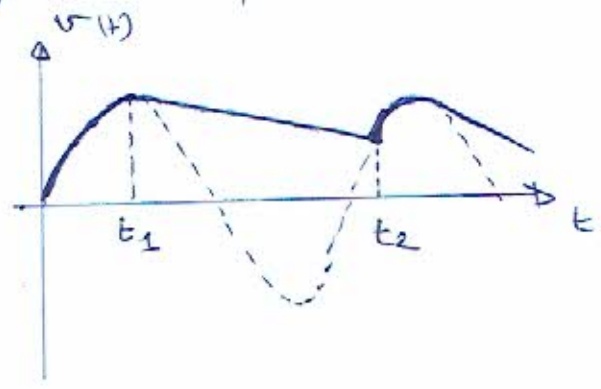
$$\tau = \sqrt{(1,11)^2 - 1} = 0,483$$

III.1.4. Filtrage:

pour diminuer l'ondulation d'un signal redressé, on utilise un filtrage après le redressement.



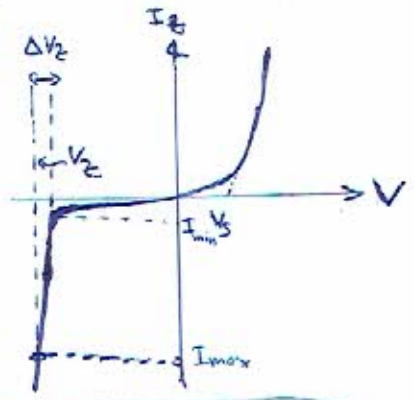
- Alt(+): D conduit \rightarrow C se charge avec une constante de temps $r_d \cdot C$, faible puisque r_d faible.
- A l'instant t_1 où $v_s(t) \geq v_e(t)$; la diode cesse de conduire \rightarrow C se décharge dans la résistance R avec une constante de temps Rc
- La diode D se remet à conduire à l'instant t_2 , où $v_e(t_2) = v_s(t_2)$ et le processus recommence.



III.1.5. Stabilisation de tension par la diode Zener:

• Diode Zener:

Une diode Zener est une diode à jonction spécialement construite pour être utilisée dans la zone de courant inverse, sur le quasi-palier de tension appelé « tension Zener V_Z » qui correspond pour les diodes ordinaires à la tension inverse maximale autorisée.

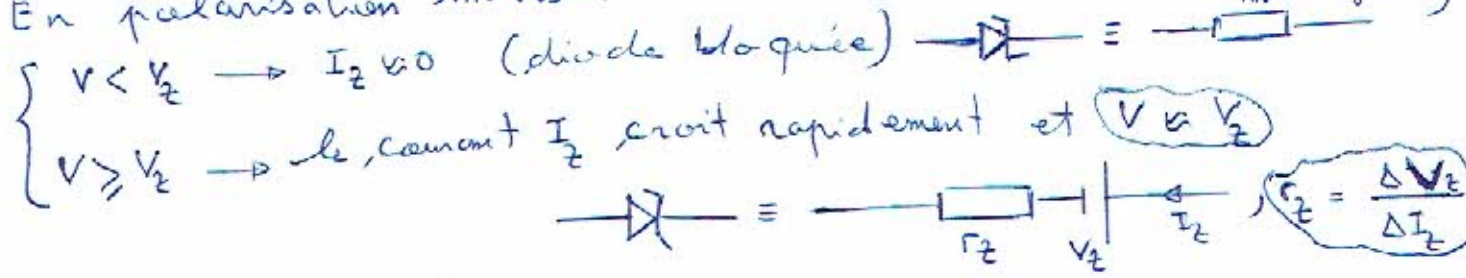


caractéristique $I_Z(V)$

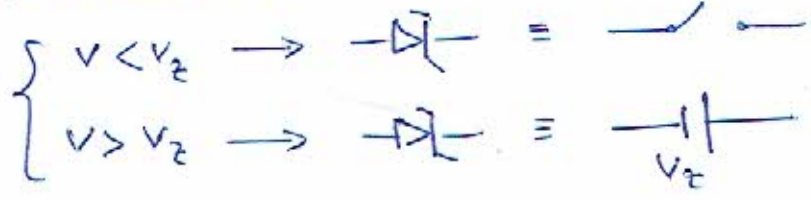
c'est une diode à jonction fortement dopée par laquelle la caractéristique inverse présente un seuil de claquage brusque. Le claquage est réversible.

↳ En polarisation direct, la diode Zener se comporte comme une diode normale.

↳ En polarisation inverse:



• diode idéale:

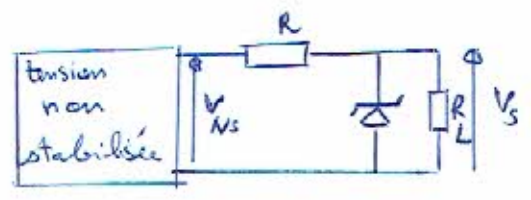


• Les régulateurs à diode Zener:

↳ Les montages électroniques nécessitent une tension stable et indépendante des fluctuations du réseau de distribution de l'énergie et de la consommation du montage. La diode Zener permet de remplir cette fonction en maintenant constante la tension de sortie tant que le point de polarisation reste dans la zone de rupture de la caractéristique:

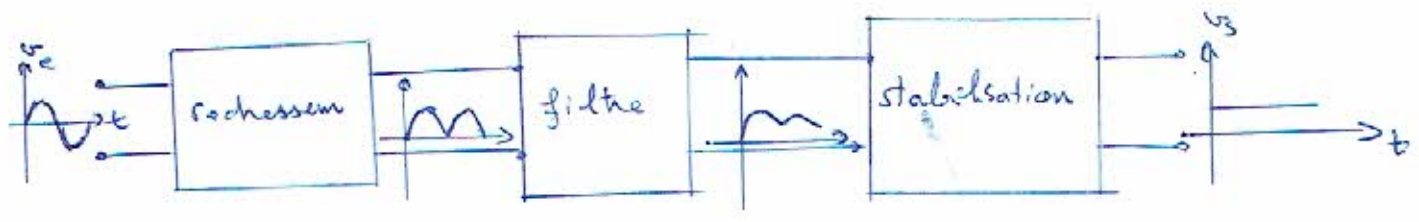
$I_{min} \leq I_Z \leq I_{max}$

La tension v est plus stabilisée. I_{max} est l'intensité maximale que peut supporter la diode avant sa destruction. Les valeurs de R et R_L jouent un rôle important dans la vérification



de la condition $I_{zmin} \leq I_z \leq I_{zmax}$. R limite I_z à ne pas dépasser I_{zmax} .

↳ conclusion:

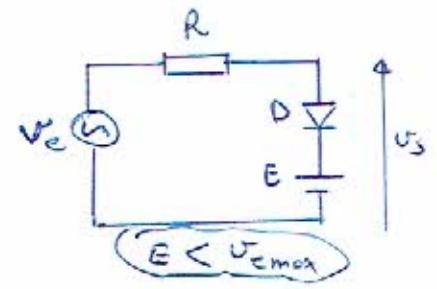


III. 2. Écrêtages:

III. 2. 1. Écrêtage de l'alternance positive:

nous allons considérer D idéale.

Le principe du montage est le suivant:

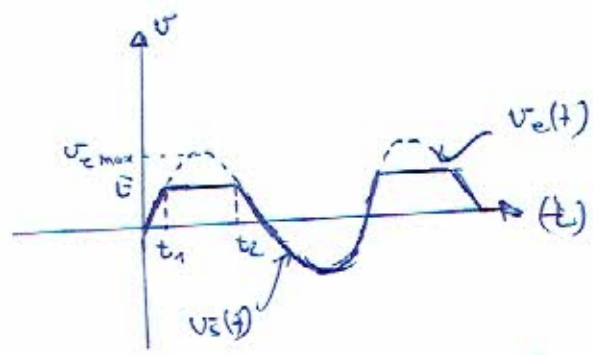


Alt (+):

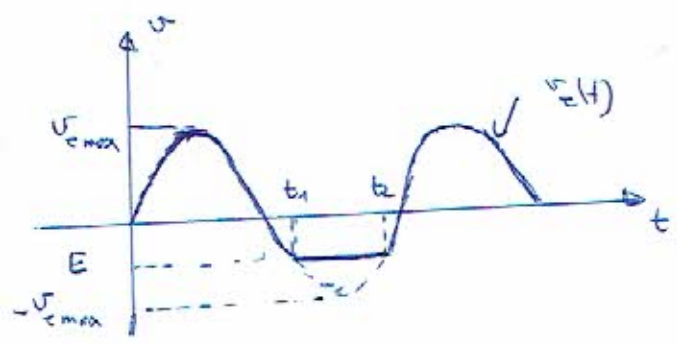
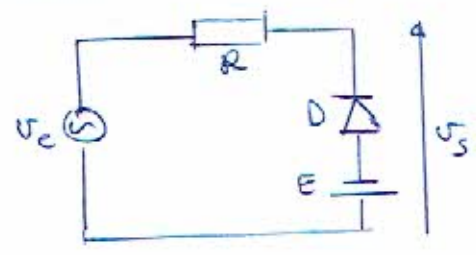
$$\begin{cases} U_e(t) > E \rightarrow D \text{ passant} \equiv C.C \rightarrow U_s(t) = E \\ U_e(t) < E \rightarrow D \text{ bloquée} \equiv C.O \rightarrow U_s(t) = U_e(t) \end{cases}$$

Alt (-)

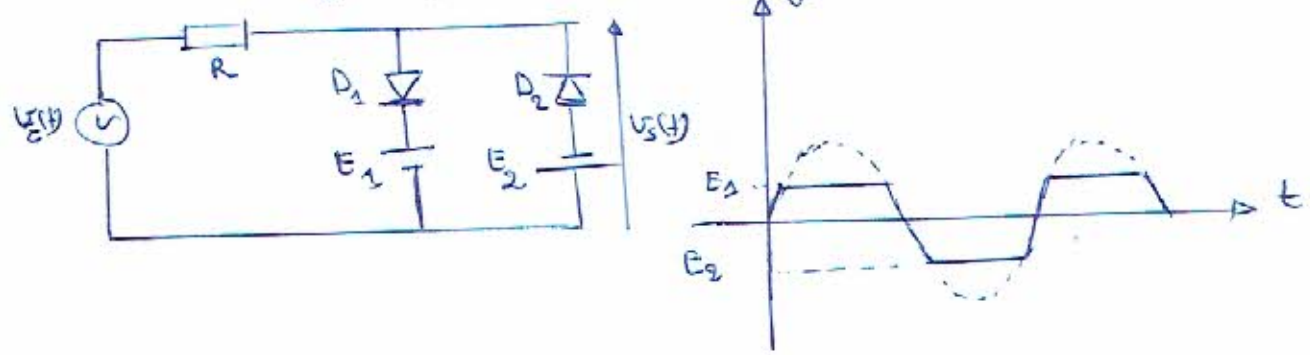
$$\begin{cases} U_e(t) < E \rightarrow D \text{ bloquée} \equiv C.O \rightarrow U_s(t) = U_e(t) \end{cases}$$



III. 2. 2. Écrêtage de l'alternance négative:

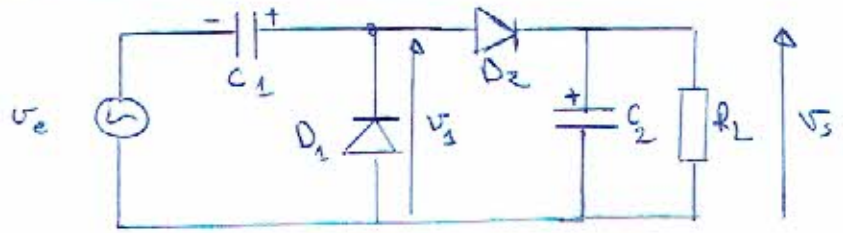


III. 2. 3. Écrêtage des deux alternances:

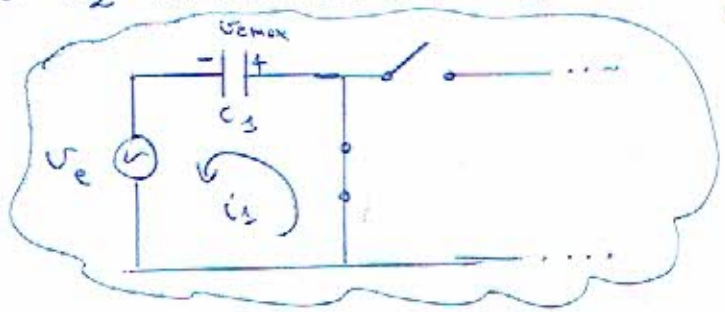


III. 3. Circuits multiplicateurs de tensions:

III. 3.1. Doubleur de tension:

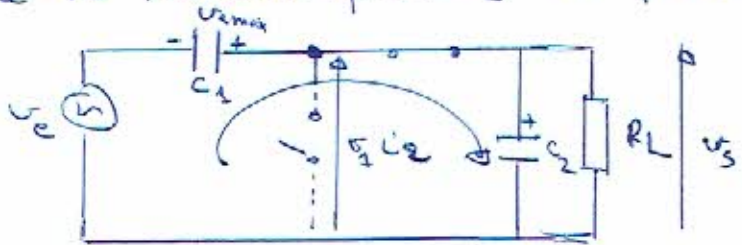


À la crête de l'alternance négative, D_1 est polarisée en direct et D_2 en inverse $\rightarrow C_1$ se charge jusqu'à V_{max} selon



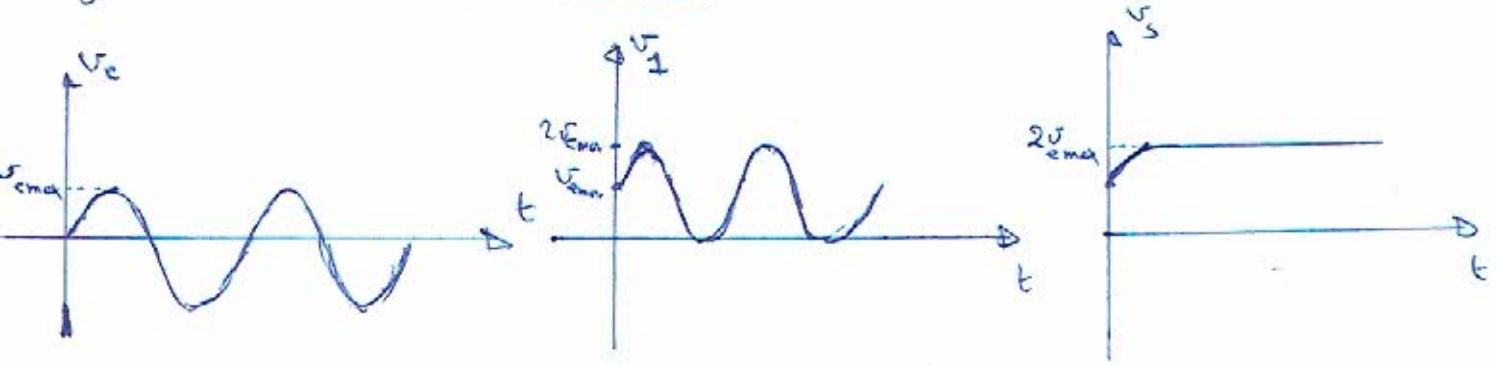
la polarité indiquée sur le circuit.

pour l'alternance positive, D_1 se trouve polarisée en inverse, elle ne conduit pas. D_2 est polarisée en direct \rightarrow conduit.

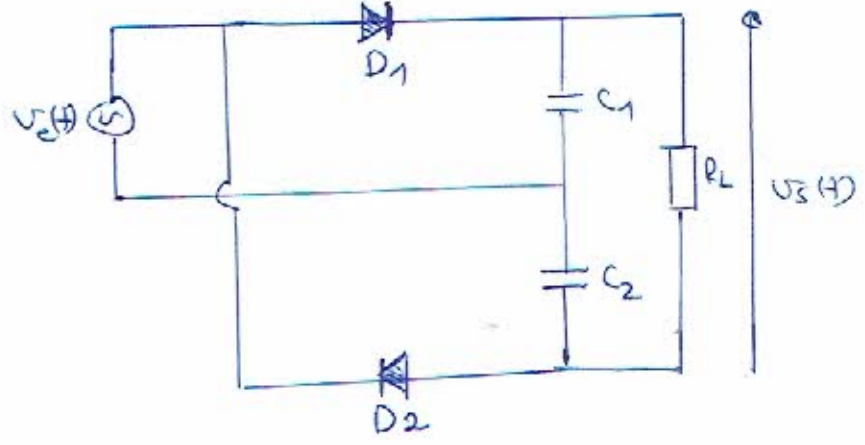


À la crête de l'alternance positive et du fait que C_1 est en série avec la source, C_2 va essayer de se charger jusqu'à $2V_{max}$. Après plusieurs cycles, la tension aux

bornes de C_2 se stabilise à $2V_{e\max}$ si R_L est suffisamment grande $\rightarrow V_S(t) = 2V_{e\max}$

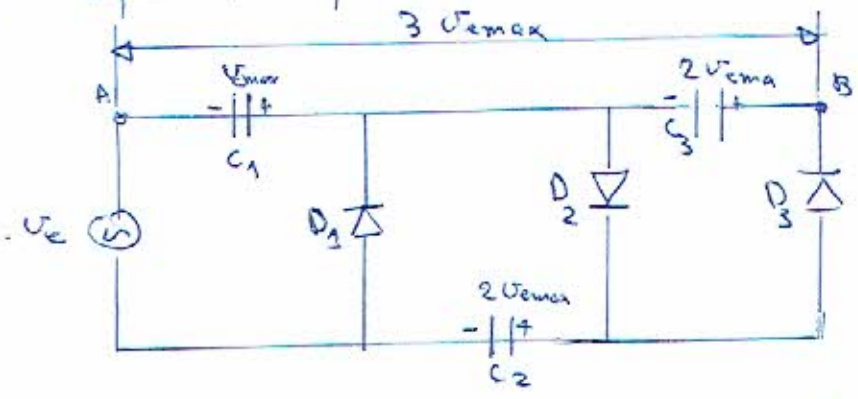


• Il existe un autre type de doublement de tension qui la tension double de celle présente à l'entrée est obtenue après la charge de deux condensateurs :



III. 3. 2. Triplement de tension :

C'est un circuit qui comporte trois cellules.



suite au raisonnement précédent, C_2 est chargé à $2V_{e\max}$. A la prochaine crête négative, D_3 conduit et charge C_3 à la valeur $2V_{e\max}$. La tension prise entre A et B sera

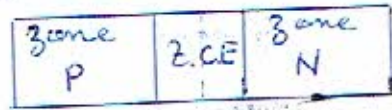
donc égale à $3 V_{emax}$

Remarque: Si on désire obtenir une tension continue égale à N fois la valeur de crête V_{emax} , on doit utiliser N cellules selon le même montage précédent.

IV. Autres types de diodes:

IV.1. Diodes à capacité variable (Varicap):

↳ Quand les deux régions N et P, d'une jonction PN, sont mis en contact, au voisinage immédiat de la jonction il se crée une zone vide des porteurs libres (électrons et trous) appelée zone de charge d'espace (Z.C.E).



↳ La jonction PN se comporte donc comme un condensateur dont la Z.C.E est le diélectrique, et les régions N et P sont les électrodes.

↳ Lorsque on polarise une jonction PN en inverse, il existe une capacité due à cette jonction nettement plus importante qu'en polarisation en direct. on l'appelle capacité de zone de déplétion, capacité de barrière, capacité de transition (C_T) ou capacité de jonction (C_j):

$$C_T = \epsilon \frac{S}{W_R}$$

S : représente la section de la jonction. W_R : l'épaisseur de la Z.C.E lorsque la jonction est polarisée en inverse.

ϵ : le constant diélectrique du semiconducteur.

↳ L'épaisseur W_R augmente si on augmente la tension inverse,

ce qui conduit à la diminution de la capacité → on obtient un condensateur dont la capacité est fonction de la tension inverse appliquée.

Symbolique:



IV. 2. Diode électroluminescente DEL (En anglais: LED):

- ✓ Dans une LED polarisée en direct, il y a émission de radiations lumineuses. Les constructeurs réalisent des LED qui émettent du rouge, du vert, du jaune, du bleu, de l'orange ou de l'infrarouge (invisible).
- ✓ La caractéristique directe d'une LED ressemble à celle d'une diode classique à jonction PN. La différence essentielle réside dans la valeur de la tension de seuil.

Symbolique d'une LED:



IV. 3. photodiode:

- ✓ La photodiode converti un signal optique (lumière) en un courant électrique.
- ✓ La photodiode est utilisée pour la détection de la lumière.

Symbolique:

