Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

CHAP2:DIODES À JONCTION PN

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

1- NOTION DE SEMI-CONDUCTEUR

L'appellation des matériaux semi-conducteurs provient de leurs conductivités électriques, intermédiaires entre celles des conducteurs et des isolants. Une autre particularité, importante, qui sera expliquée plus loin, est que cette conductivité, contrairement aux conducteurs courants, dépend beaucoup de la température et augmente avec celle-ci.

1,1 **Semi-conducteur intrinsèque**

Les corps simples semi-conducteurs sont obtenus dans le groupe IV de la classification périodique des éléments (voir le tableau 1.1). Ce sont le germanium, et surtout le silicium.

Tableau 1.1 Classification périodique de Mendeleiev

	III	IV	V	
	5 B (Bore)	6 C (Carbone)	7 N (Azote)	
	13 Al (Aluminium)	14 Si (Silicium)	15 P (Phosphore)	16 S (Soufre)
30 Zn (Zinc)	31 Ga (Gallium)	32 Ge (Germanium)	33 As (Arsenic)	34 Se (Sélénium)
48 Cd (Cadmium)	49 In (Indium)	50 Sn (Etain)	51 Sb (Antimoine)	

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

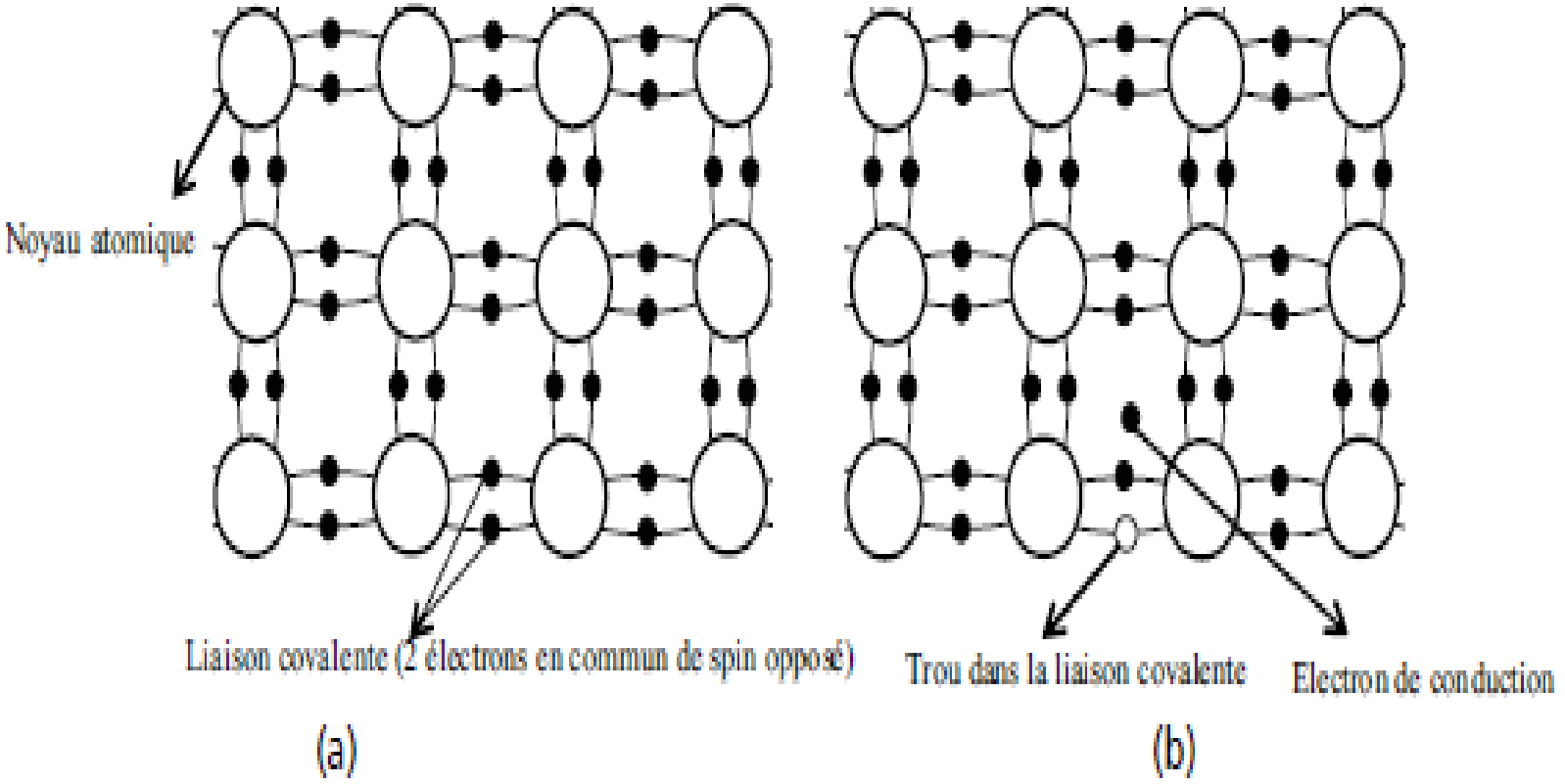
Les corps simples semi-conducteurs ont la caractéristique principale d'être tétravalent, c'est-à-dire que leur couche extérieure comporte 4 électrons.

Les liaisons entre atomes sont des liaisons de valence, très stables, chaque atome mettant un électron périphérique en commun avec chaque proche voisin. Leur couche périphérique se trouve ainsi complétée à huit électrons, ce qui est une configuration très stable.

Au zéro absolu, il n'y a pas d'agitation thermique et tous les électrons périphériques participent aux liaisons covalentes ; aucun n'est donc libre pour participer à la conduction électrique : le corps est isolant.

Lorsqu'on élève la température, l'agitation thermique permet à quelques électrons de se libérer de la liaison covalente, et d'être mobiles dans le cristal.

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main



1.2 Notion de trou

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

On voit que la perte de l'électron a provoqué un site vacant, ou trou, dans le cristal. L'atome considéré est ionisé positivement, mais l'ensemble du cristal reste électriquement neutre.

Le trou créé va participer à la conduction électrique. En effet, supposons que le matériau semi-conducteur considéré soit baigné dans un champ électrique $\overrightarrow{E}$.

Les électrons libres vont bien sûr dériver dans la direction opposée au champ, sous l'action de la force $\overrightarrow{F}$ (Fig1.2)

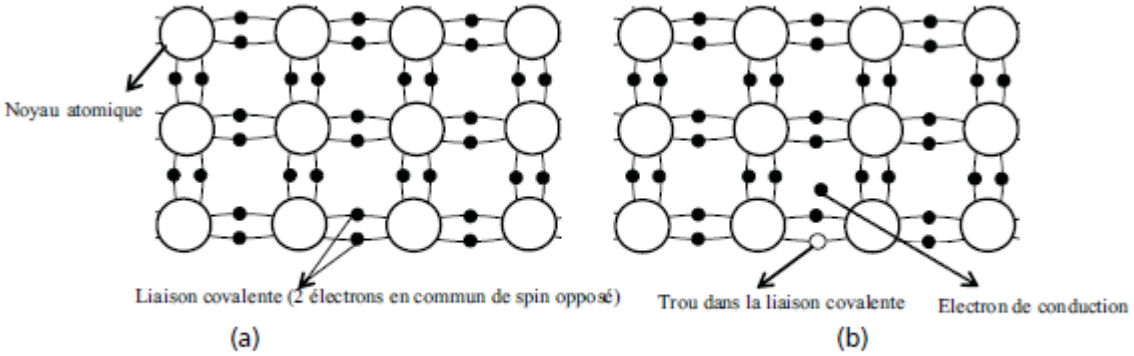


Figure 1.2 Liaison de covalence en (a) et création d'une paire électron trou en (b).

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

1.3 Semi-conducteur extrinsèque

L'utilisation du semi-conducteur pur présente assez peu d'intérêt. L'utilisation de semi-conducteur dans la plupart des composants électroniques se fait dans un état dit dopé (semi-conducteur extrinsèque), par opposition avec le semi-conducteur pur, ou intrinsèque.

a) Semi-conducteur de type N

Supposons par exemple que dans un semi-conducteur très pur, on introduise volontairement un corps pentavalent (métalloïde : phosphore, arsenic, antimoine) dans une proportion (taux de dopage) d'un atome *d'impureté* pour 10^5 à 10^8 atomes de semi-conducteurs. On a alors, dans le cristal, la situation schématisée en figure 1.3.

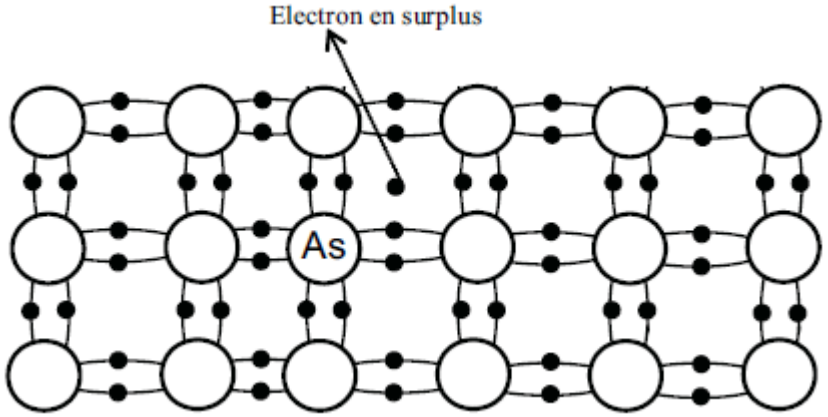


Fig.1.3 Effet du dopage pour augmenter le nombre d'électrons libres.

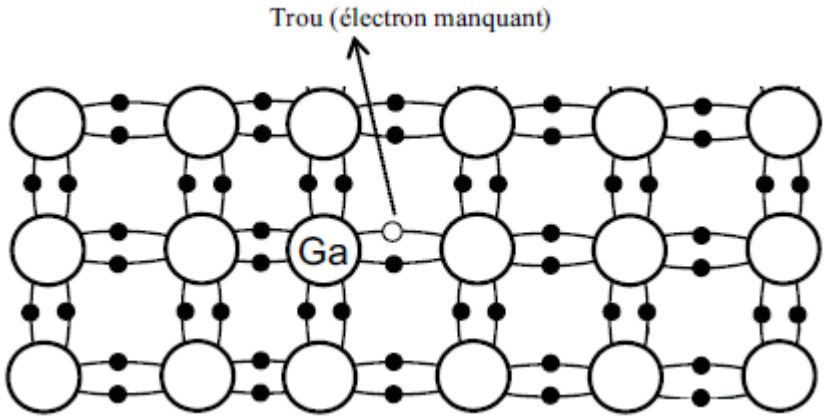
L'électron en surplus n'entrant pas dans une liaison covalente n'est que faiblement lié à l'atome pentavalent. À la température ambiante, il est libre dans le semi-conducteur (à cause de l'agitation thermique) et participe à la conduction. Il en est pratiquement ainsi de tous les électrons en excès venant de l'impureté pentavalente. Le semi-conducteur extrinsèque ainsi constitué est dit de *type N*. L'impureté dans ce cas est appelée ***donneur*.**

Remarque. La neutralité globale du semi-conducteur est bien sûr conservée, à chaque électron libre dans le cristal, correspondant un ion positif d'impureté dans le même cristal.

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

b) Semi-conducteur de type P

Introduisons maintenant dans le semi-conducteur intrinsèque, en faible quantité, un corps trivalent (par exemple Bore, Aluminium, Gallium ou Indium). Les atomes de cette *impureté* vont se substituer, de place en place, à ceux du semi-conducteur : figure 1.4.



Une lacune apparaît dans la liaison covalente, à l'endroit de chaque atome accepteur.

À la température ambiante, cette lacune est comblée par un électron voisin sous l'effet de l'agitation thermique, formant un trou positif dans le cristal, libre de se déplacer à l'intérieur de celui-ci. On trouve donc, à température ambiante, pratiquement autant de trous libres que d'atomes *accepteurs*. Bien sûr, la neutralité du cristal est conservée globalement chaque atome accepteur étant ionisé négativement après capture d'un électron. Le semi-conducteur extrinsèque ainsi crée est dit de *type P*.

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

2 La jonction PN

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

Une jonction est constituée par la transition, dans un même monocristal de semi-conducteur, entre deux zones dont l'une est de type N et l'autre de type P.

2.1 **Jonction isolée**

a) Diffusion des majoritaires et zone de transition

Les porteurs majoritaires de la zone P diffusent vers la région N, où ils sont beaucoup moins nombreux. De même, les électrons de la région N diffusent vers la zone P. Ce phénomène de diffusion s'arrête avant que la répartition des trous et des électrons dans tout le cristal ne soit homogène. Un *autre phénomène* intervient.

Dans la zone P, au voisinage de la jonction, les trous et les électrons sont en grande quantité. Ces deux types de porteurs ont donc une forte probabilité de recombinaison, si bien que la concentration en porteurs mobiles dans la zone P au voisinage de la jonction est très faible.

De même, la zone N au voisinage de la jonction est pratiquement dépourvue de porteurs. Une zone pratiquement dépourvue de porteurs mobiles s'étend donc de part et d'autre de la jonction (sur une épaisseur de l'ordre du micron). On l'appelle zone de transition. figure 2.1 (b)

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

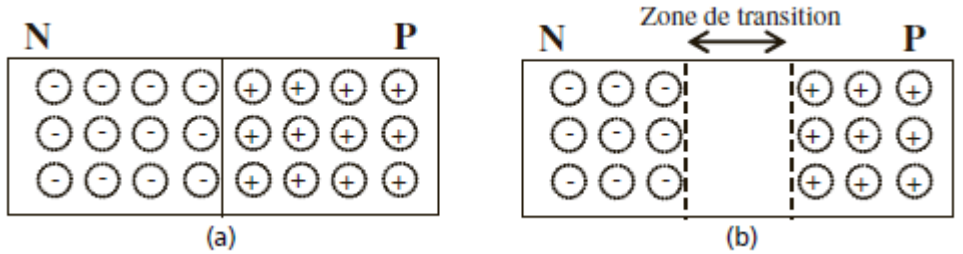


Fig. 2.1 Principe de la création d'une zone de transition.

Les charges des porteurs fixes (ions d'impuretés) n'y sont plus compensées par celles des porteurs mobiles. On trouve donc, dans la zone de transition :

– en zone P une région chargée négativement par les atomes accepteurs ionisés ;

– en zone N une région chargée positivement par les atomes donneurs ionisés.

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

b) Équilibre et conduction des porteurs minoritaires

Le champ électrique interne prenant naissance à cause de la charge d'espace en zone de transition a pour premier effet de freiner la diffusion des porteurs majoritaires. De plus, un courant dû aux minoritaires (électrons en zone P, trous en zone N) s'établit, le champ interne ainsi crée favorisant leur passage.

Le sens de ce courant est, bien sûr, opposé au courant de diffusion des majoritaires. À l'équilibre, le courant de diffusion des majoritaires est équilibré par le courant de conduction des minoritaires (appelé courant de saturation).

c) Équations de la jonction à l'équilibre

La neutralité électrique du cristal étant conservée, le nombre d'ions négatifs en zone de transition P est donc égal au nombre d'ions positifs en zone de transition coté N. On suppose les densités de charge d'espace constantes en zone de transition, de part et d'autre de la jonction, ce qui représente une bonne approximation de la réalité. On en déduit la relation :

$$q N_A . x_p = q N_D x_n$$

Avec : N_A : densité d'atomes accepteurs en zone P
N_D : densité d'atomes donneurs en zone N
x_p et x_n profondeur de la zone de transition en zone P et en zone N

Les caractéristiques du champ et du potentiel internes sont données par l'équation de Poisson.

$$\Delta\Psi + \frac{\rho}{\varepsilon} = 0 \quad \text{et} \quad \overrightarrow{E_{int}} = -\overrightarrow{\text{grad}\ \Psi}$$

Fomesoutra.com
ça soutra
Docs à portée de main

ρ représente la densité de charge d'espace et Ψ est le potentiel interne. On démontre que la variation du potentiel interne $V_b = \Psi_N - \Psi_P$, ou barrière de potentiel, entre la zone N et la zone P vaut : $V_b = 0{,}6$ à $0{,}7$ volt pour le silicium.

Cette barrière de potentiel représente l'obstacle à franchir par les porteurs majoritaires diffusant à travers la jonction. En appelant ℓ_t la longueur totale de la zone de transition, on a : $\ell_t = x_p + x_n$, le champ interne maximum se produit au niveau de la jonction et vaut E_0 :

$$V_b \approx \frac{KT}{q}\text{Ln}\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \quad \text{et} \quad E_0 = 2\frac{V_b}{\ell_t} - \overrightarrow{\text{grad}\ \Psi}$$

Valeur numérique. En supposant $2V_b \approx 1$ V et $\ell_t = 1\ \mu$, on obtient : $E_0 = 10^6$ V/m.

Remarque. La zone de transition s'étend le plus profondément dans la zone la moins dopée. Dans le cas pratique d'un transistor bipolaire, il s'agit d'une zone appelée émetteur qui est 1 000 fois plus dopée que l'autre (appelée base), la zone de transition s'étend presque exclusivement dans la base.

d) Expression des courants de diffusion et de saturation

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

Le courant de diffusion des majoritaires associés sera donc de la forme : $I_D = I_0 \, e^{\frac{-qV_b}{kT}}$

Ce courant de saturation est une fonction croissante de la température, comme le nombre de porteurs minoritaires dans le cristal.

À l'équilibre, le courant global est nul, et les deux courants I_D *et* I_S.

$$I_S = I_D = f(Tj, V_b) = I_0 \, e^{-\frac{qV_b}{kT}}$$

2.2 **Polarisation de la jonction PN**

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

a) Polarisation direct de la jonction PN

Soit le dispositif de la figure 2.2, constitué d'une jonction PN aux bornes de laquelle on applique une tension extérieure $V = V_p - V_n$ positive. Cela revient à faire passer la différence de potentiel entre les extrémités de la zone de transition de V_b à $V_b - V$.

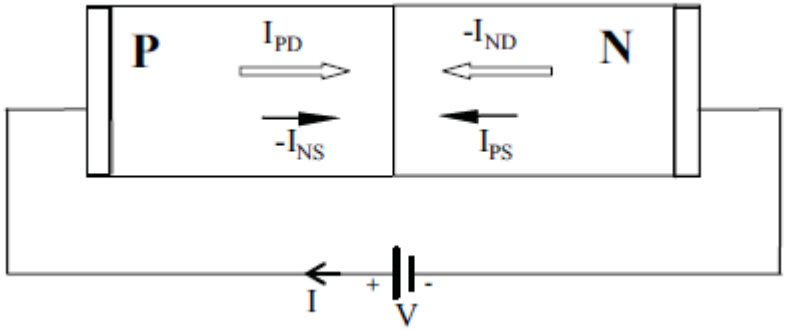


Fig. 2.2 Jonction PN polarisée en direct.

Le courant de diffusion des majoritaires va donc se trouver augmenté, la probabilité γ de diffusion, et donc le courant associé est maintenant proportionnel à γ, par contre, le courant de saturation dû aux minoritaires se trouve pratiquement inchangé si la température de la jonction ne varie pas.

$$\gamma = e^{-\frac{q(V_b - V)}{kT}}$$

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

Un courant prend naissance comme conséquence de la tension directe appliquée, ayant comme valeur : $I = I_D - I_S$. Ce courant, principalement dû aux majoritaires, traverse la jonction dans le sens P vers N.

Pour $V = 0$, on a : $I_D = I_S = I_0\, e^{-\frac{qV_b}{kT}}$

Pour $V > 0$, I_S garde la même valeur et I_D augmente pour prendre la valeur :

$$I_D = I_0\, e^{-\frac{q(V_b - V)}{kT}} = \underbrace{I_0\, e^{-\frac{qV_b}{kT}}}_{I_s}\, e^{\frac{+qV}{kT}}$$

Soit : $I_D = I_S\, e^{\frac{qV}{kT}}$

Le courant total vaut donc : $I = I_S\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$

C'est une équation fondamentale dans la théorie des diodes et des transistors.

Valeurs numériques. $\frac{kT}{q} = 26\ \text{mV}$ donc : $\frac{q}{kT} \approx 39\ \text{V}^{-1}$ à $T \approx 300\ \text{K}$

D'où : $I = I_S\left(e^{39V} - 1\right) = I_S\left(e^{\frac{V}{0,0026}} - 1\right)$

$V = 0{,}1$ Volt, le courant est : $I = I_S\left(e^{3,9} - 1\right) = I_S\,(49{,}4 - 1) = 48{,}4\ I_S$

Donc si $V > 0{,}1$ V, alors : $I \approx I_S\, e^{\frac{qV}{kT}}$ car alors on a : $e^{\frac{qV}{kT}} \gg 1$.

b) Jonction PN polarisée en inverse

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

C'est le cas schématisé en Fig2.3, la différence de potentiel appliquée aux bornes de la zone de transition atteint $V_b - V$ et le courant de diffusion des majoritaires est proportionnel à :

$$\gamma = e^{-\frac{q(V_b - V)}{kT}}$$

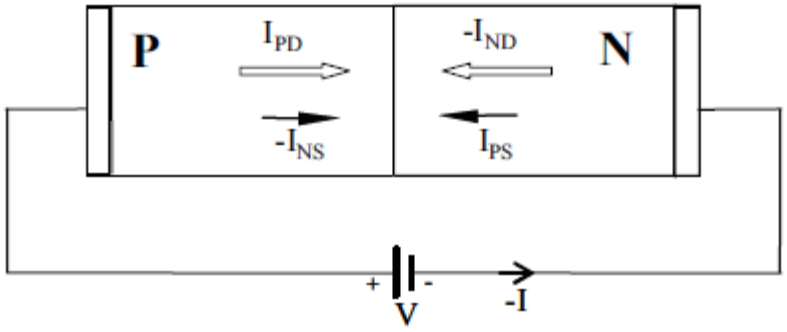


Fig.2.3 Jonction PN polarisée en inverse

Pour $|V| > 0{,}1$, le courant de diffusion des majoritaires devient négligeable devant le courant de saturation des minoritaires.

Exemple numérique. Pour une valeur $V = -0{,}1$ Volt, on a $I = I_S\left(e^{-39\times 0{,}1} - 1\right) \approx I_S$ à 300 K.

Ce courant inverse est indépendant de la tension appliquée et ne dépend que de la température. Il reste très faible devant les courants directs ($\sim 10^{-9}$A pour Si).

3 DIODE À JONCTION

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

3.1 Diode à jonction idéale

La jonction PN étudiée précédemment présente donc un effet unidirectionnel très marqué ; en polarisation directe ($V > 0$), équivalent à un court-circuit le courant croit très rapidement (exponentiellement) en fonction de la tension, alors qu'en polarisation inverse ($V < 0$), équivalent à un circuit ouvert , le courant traversant la jonction est pratiquement négligeable.

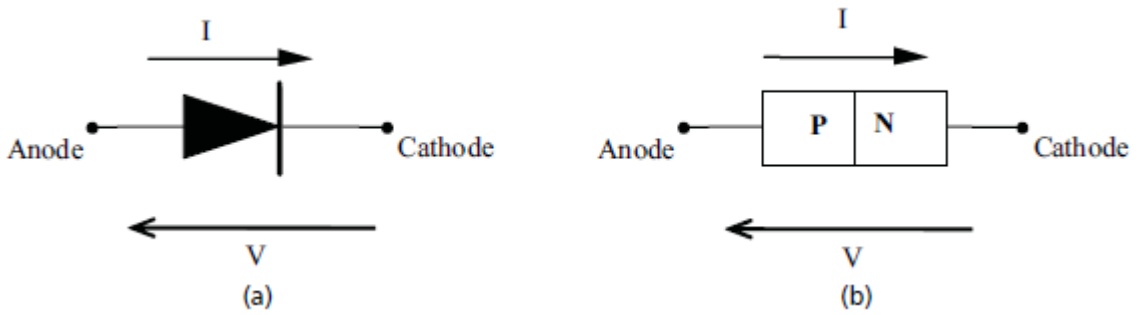


Fig.2.4 Représentation symbolique (a) de la diode à jonction (b).

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

La caractéristique courant tension d'une diode à jonction au silicium est donnée en Fig.2.4 à deux températures différentes.

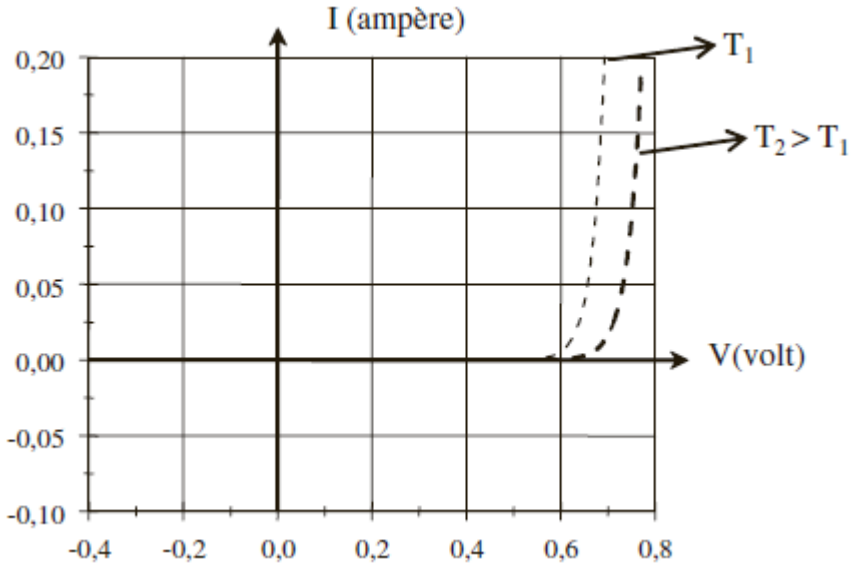


Fig.2.4 : Caractéristique courant-tension d'une diode idéale.

3.2 Diode à jonction réelle

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

a) Diode polarisée en inverse

Dans le cas du silicium où I_S est théoriquement très faible de l'ordre de 10^{-12}A, des courants parasites se superposent au courant de saturation (courants de surfaces, contribution des défauts cristallins...), si bien que le courant inverse n'est pas constant en fonction de la tension appliquée, et est beaucoup plus fort que prévu. Pratiquement, pour le silicium, le courant inverse est de l'ordre de 10^{-9} A par mm^2 de jonction, et double tous les 12 à 15 °C.

b) Diode polarisée en directe

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

Pour les faibles tensions directes ($V < 0{,}5$ volt), le courant suit la loi :

$$I = I_S \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right)$$

Pour les courants moyens on a :

$$I = I_S \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right), \text{ avec } 1 < n < 1{,}5$$

Pour les forts courants (fortes injections) le courant est plus faible également que le courant théorique.

Le coefficient n est le coefficient de non-idéalité de la diode. Certains auteurs l'appellent coefficient d'idéalité.

4. Modèles statiques de la diode à jonction PN

a) L'utilité des modèles

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

Un modèle consiste en une représentation simplifiée du fonctionnement de la diode en vue de faciliter l'analyse d'un phénomène ou l'étude d'un système. La diode est un élément non linéaire, or l'analyse d'un comportement non linéaire est assez difficile. On remplace donc les diodes par des modèles linéaires. Il y a différents modèles selon l'analyse ou l'étude souhaitée. Pour analyser un circuit électrique qui fonctionne en *régime continu* (*statique*) on utilise :

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

b) Le modèle idéal

La *représentation graphique* du modèle idéal d'une diode à jonction PN est représentée à la figure 2.5 (a). Il s'agit d'un interrupteur fermé en polarisation directe (b) et ouvert en polarisation inverse (c).

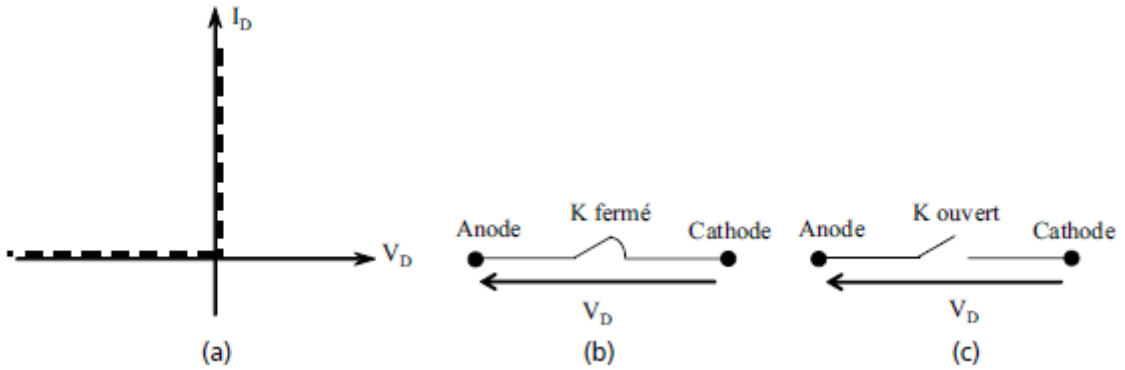


Fig. 2.5 Caractéristique $I_D = f(V_D)$ d'une diode idéale (a), modélisée en polarisation directe (b) et en polarisation inverse (c).

En direct, la diode est considérée comme un court-circuit : $V_D = 0$ pour $I_D \geq 0$.

En inverse, la diode est considérée comme un circuit ouvert : $I_D = 0$ pour $V_D \leq 0$.

Ce modèle est le plus simple, mais le moins précis. Il est utilisé pour des estimations rapides et pour des analyses de circuits complexes et surtout en électrotechnique.

Fomesoutra.com
ça soutra
Docs à portée de main

On rajoute au modèle précédent la tension de seuil $V0$ qui représente la tension du coude de la diode. Cette tension correspond à la barrière de potentiel à vaincre de la jonction PN, elle est appelée aussi le potentiel de contact de la jonction PN.

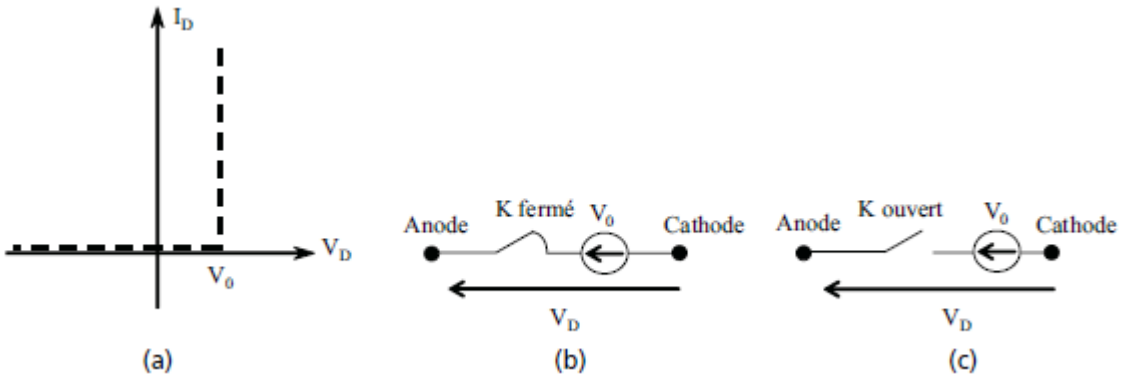


Fig 2.5 Caractéristique $I_D = f(V_D)$ d'une diode à seuil (a), modélisée en polarisation directe (b) et en polarisation inverse (c).

En direct, on rajoute une force contre électromotrice V_0 : $V_D = V_0$ pour $I_D \geq 0$.

En inverse, la diode est considérée comme un circuit ouvert : $I_D = 0$ pour $V_D \leq V_0$.

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

d) Le modèle linéarisé

Dans ce modèle, dès que la tension dépasse V_0, on rajoute une résistance r_D qui reflète une variation linéaire du courant en fonction de la variation de la tension.

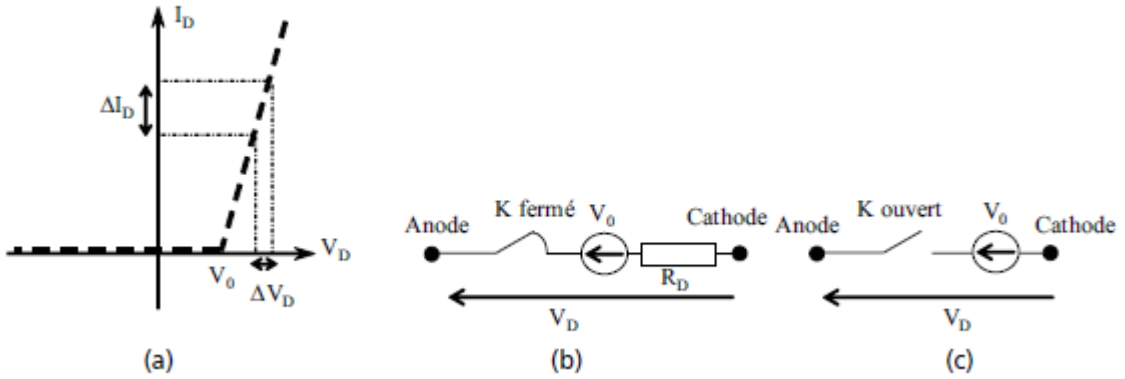


Fig.2.6 Caractéristique $I_D = f(V_D)$ d'une diode linéarisée (a), modélisée en polarisation directe (b) et en polarisation inverse (c).

En direct, on rajoute V_0 et une résistance dynamique moyenne r_D : $V_D = V_0 + r_D I_D$ pour $I_D \geq 0$.

En inverse, la diode est considérée comme un circuit ouvert : $I_D = 0$ pour $V_D \leq V_0$.

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

La ***résistance dynamique moyenne r_D*** est déterminée par la pente moyenne de la partie utilisée de la caractéristique directe de la diode :

$$r_D = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

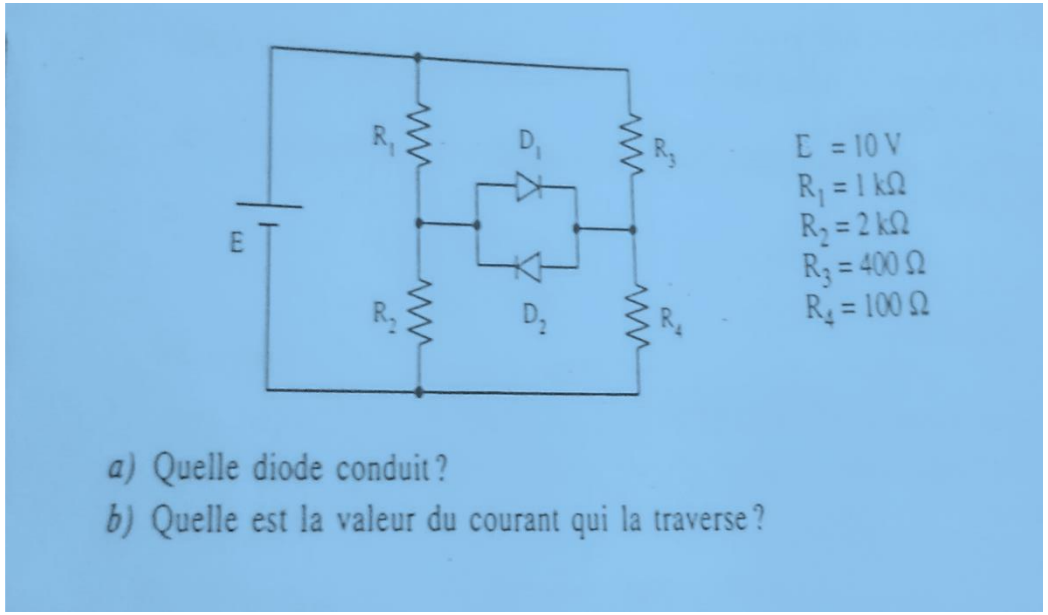
Ce dernier modèle représente une très bonne approximation linéaire de la caractéristique d'une diode réelle. Il est plus précis que le deuxième, mais plus complexe.

6 MÉTHODE D' ANALYSE DES CIRCUITS EN RÉGIME STATIQUE CONTENANT DES DIODES À JONCTION PN

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

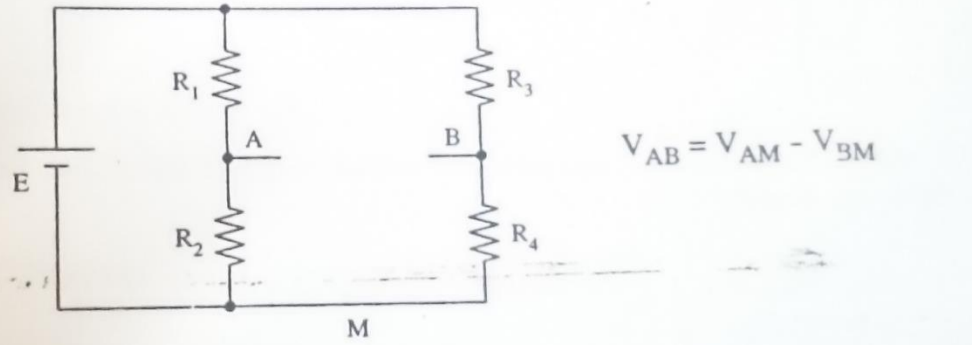
* Pour savoir si une diode conduit ou ne conduit pas, il suffit de déterminer la valeur de la différence de Potentiel entre les deux bornes P et N de connections (diode retirés) .

Exercice 1



Solution

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main



$$V_{AB} = V_{AM} - V_{BM}$$

$$V_{AM} = E\frac{R_2}{R_1 + R_2} = 10 \cdot \frac{2}{1+2} = 6{,}66\,V$$

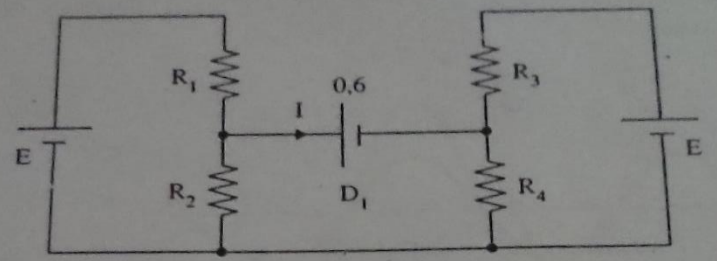
$$V_{BM} = E\frac{R_4}{R_3 + R_4} = 10 \cdot \frac{1}{4+1} = 2\,V$$

$$V_{AB} = 6{,}66 - 2 = 4{,}66\,V$$

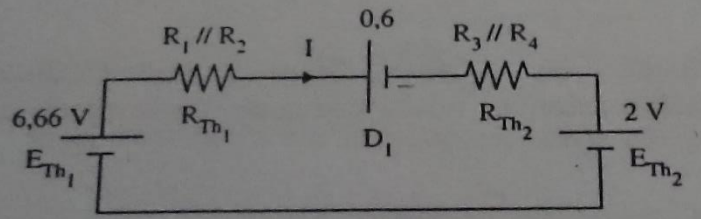
Cette valeur supérieure à 0,6 V indique que la diode D_1 conduit et impose 0,6 V (modèle 2).

b) La valeur du courant qui la traverse est obtenue à partir des schémas suivants :

— séparation des deux diviseurs de tension



— transformation en générateurs de Thévenin



$R_1 // R_2 = 666\ \Omega$

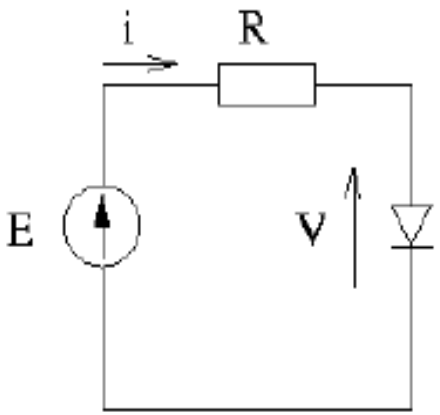
$R_3 // R_4 = 80\ \Omega$

soit

$$I = \frac{6{,}66 - 0{,}6 - 2}{666 + 80} = 5{,}4\ mA$$

** Etude d'un circuit simple

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main



On veut déterminer V et I.

D'après la loi des mailles :

$$E = R.I + V$$

Connaissant E et R, il faut une deuxième relation pour déterminer V et I : la caractéristique de la diode.

résolution analytique

Il faut établir l'équation de la caractéristique de la diode.

{ 2 inconnues
{ 2 équations

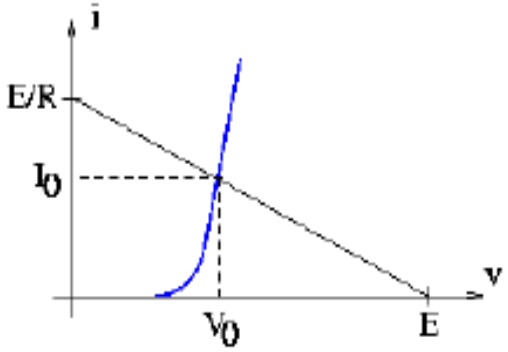
solution graphique

Il faut représenter sur le même graphe :

- caractéristique de la diode,
- la droite représentant l'équation $I = (E - V) / R$.

Pour $I = 0$, $V = E$.

Pour $V = 0$, $I = E / R$.

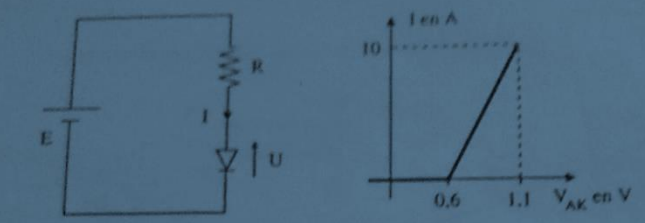


Le point de fonctionnement s'établit à l'intersection des deux courbes : I_0, V_0 .

Exercice 2

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

☐ Exercice 1

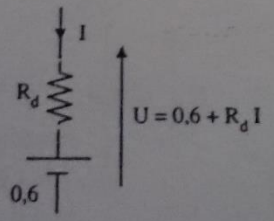


$E = 3\ V$
$R = 0{,}5\ \Omega$

a) Quel est le schéma équivalent de la diode définie par sa caractéristique $I(V_{AK})$?
b) Que vaut la tension U ?
c) Quelle est la puissance dissipée dans la diode ?

Solution

a) Le schéma équivalent de la diode est celui du modèle 3. Pour $I \geqslant 0$, nous avons



$U = 0{,}6 + R_d I$

avec

$$R_d = \frac{\Delta V_{AK}}{\Delta I} = \frac{1{,}1 - 0{,}6}{10 - 0} = 0{,}05\ \Omega$$

b) On obtient la tension U de deux façons différentes.

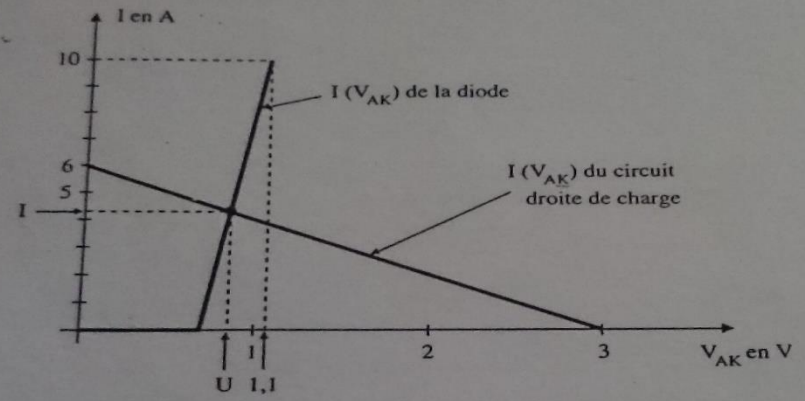
— ***Méthode graphique***

On trace dans le premier quadran de $I(V_{AK})$, la caractéristique de la diode et la droite de charge définie par l'équation

$$E = RI + V_{AK}$$

soit

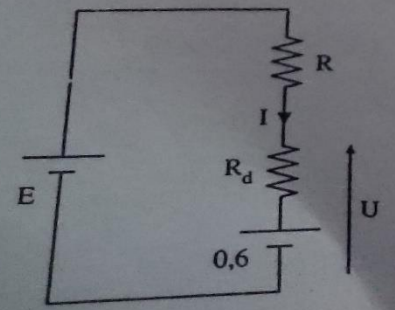
$$I = -\frac{1}{R} V_{AK} + \frac{E}{R} \quad \begin{cases} I = 0 \rightarrow V_{AK} = E = 3\ V \\ V_{AK} = 0 \rightarrow I = \frac{E}{R} = 6\ A \end{cases}$$



Le point de rencontre des deux graphes nous fournit le point de fonctionnement

$$U \simeq 0{,}8\ V, \qquad I \simeq 4{,}3\ A$$

— ***Méthode par le calcul utilisant le modèle électrique équivalent***



équations de mailles

$+ E - RI - R_dI - 0{,}6 = 0$

$U = R_dI + 0{,}6$

La résolution fournit

$$I = \frac{E - 0{,}6}{R + R_d} = \frac{3 - 0{,}6}{0{,}5 + 0{,}05} = 4{,}36\ A$$

$$U = 0{,}05 \cdot 4{,}36 + 0{,}6 = 0{,}82\ V$$

Remarquons que cette méthode est beaucoup plus rapide et précise que la méthode graphique.

c) La puissance dissipée est obtenue à partir de la relation de Joule

$$P = UI = 0{,}82 \cdot 4{,}36 = 3{,}6\ W$$

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

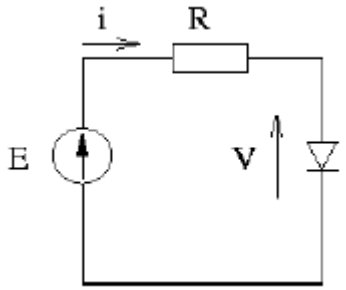
Exercice 3

Pour le circuit suivant I

Calculer I si :

1er cas E= + 5*V, R*=100Ω*,Vd*=0,7*V, rd*=1 Ω.

2e cas E= - 5*V, R*=100Ω*,Vd*=0,7*V, rd*=1 Ω



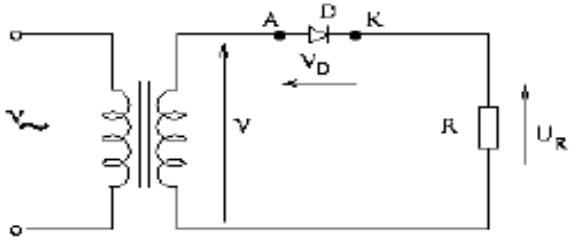
Exercice 4

5. APPLICATIONS DES DIODES AUX REDRESEMENTS

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

But : obtenir une tension continue à partir d'une ou plusieurs tensions alternatives

5.1 *Redressement mono-alternance*



Transformateur permettant d'abaisser la tension

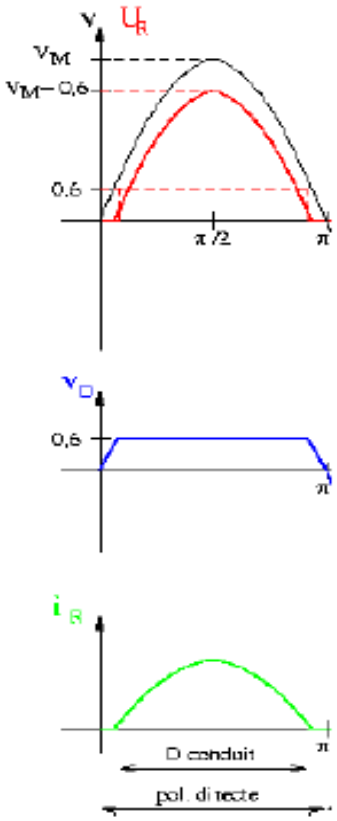
$V = V_M \sin \omega.t$

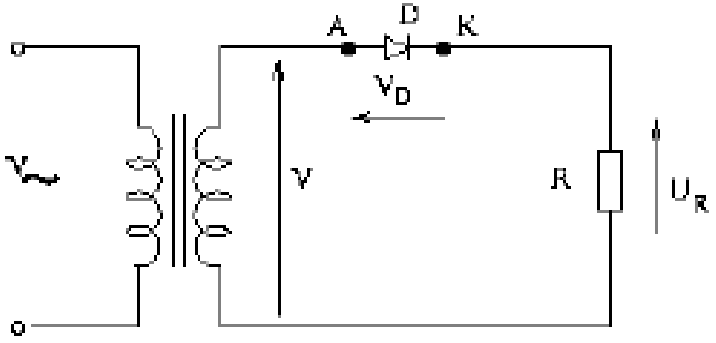
Pour $0 < \omega.t < \pi$

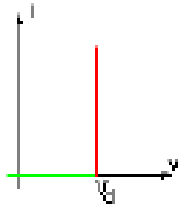
$V > 0 \Rightarrow V_A > V_K$

$\Rightarrow$ polarisation directe $\Rightarrow$ D conduit si V > 0,6 V

$U_R = V - V_D = V - 0,6$ et $i_R = U_R / R$

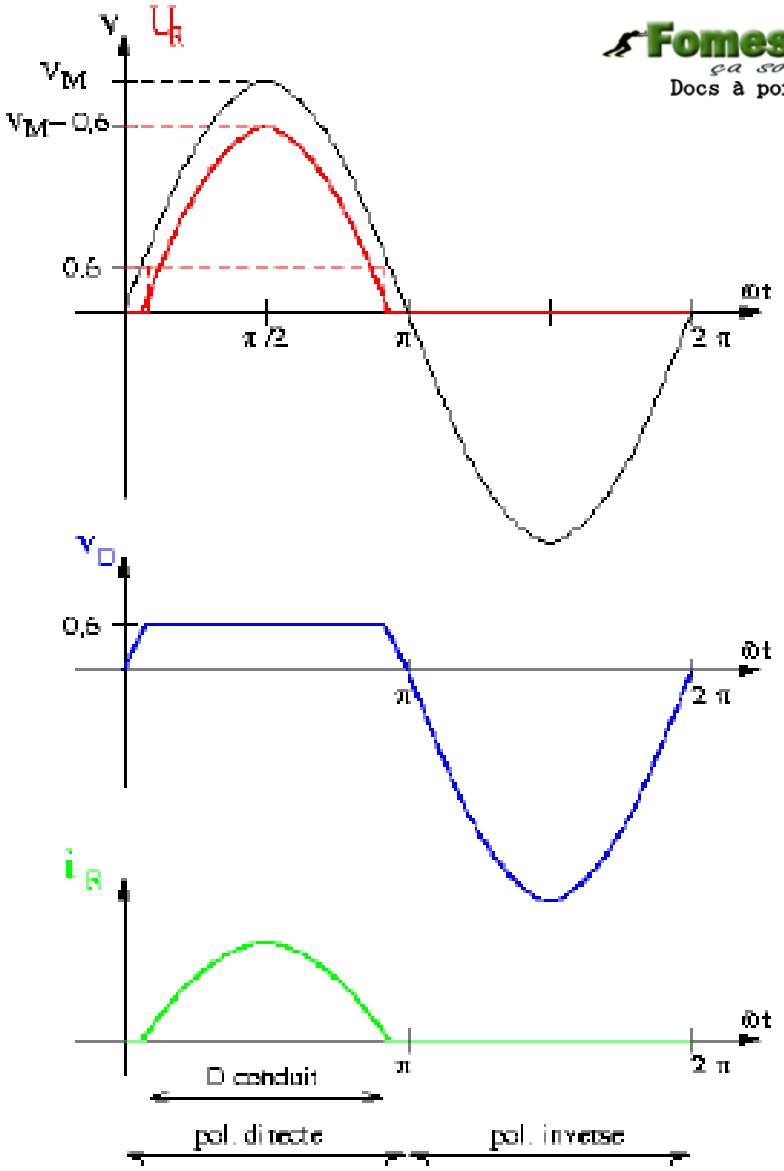






$$V = V_M \sin \omega.t$$

Transformateur permettant
d'abaisser la tension



Pour $0 < \omega.t < \pi$

$V > 0 \Rightarrow V_A > V_K$

$\Rightarrow$ polarisation directe $\Rightarrow$ D conduit si V > 0,6 V

$U_R = V - V_D = V - 0,6$ et $i_R = U_R / R$

Pour $\pi < \omega.t < 2\pi$

$V < 0 \Rightarrow V_A < V_K$

$\Rightarrow$ polarisation inverse $\Rightarrow$ D est bloquée

$i_R = 0 \Rightarrow U_R = 0$ et $V_D = V$

Fomesoutra.com
ça soutra
Docs à portée de main

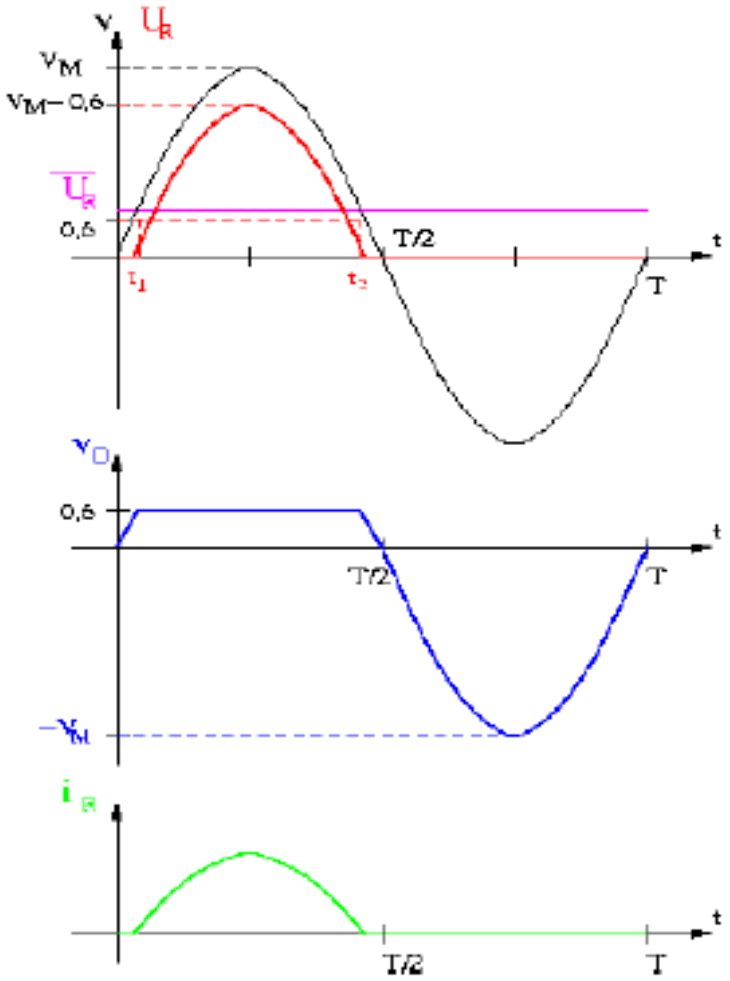
Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

valeurs moyennes

$$\overline{U_R} = \frac{1}{T}\int_0^T U_R(t)\,dt = \frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_2} (V_M \sin(\omega \cdot t) - 0{,}6)\,dt$$

$$\overline{U_R} \approx \frac{1}{T}\int_0^{T/2} V_M \sin(\omega \cdot t)\,dt = \frac{V_M}{\pi}$$

$$\overline{I_R} = \frac{\overline{U_R}}{R} = \frac{V_M}{\pi} \cdot \frac{1}{R} = \overline{I_D}$$



valeur efficace

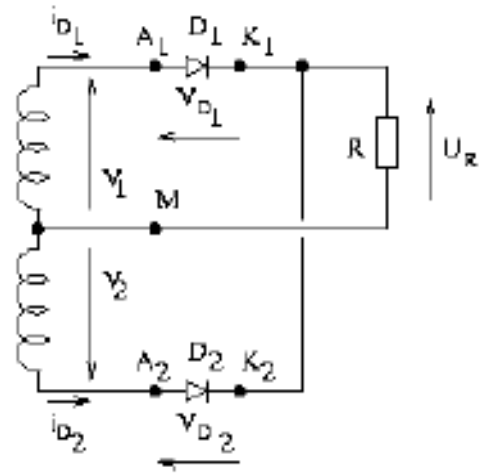
$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U_R^2(t)\,dt}$$

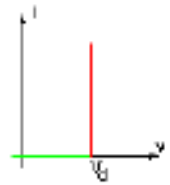
tension inverse maximale aux bornes de D

$$V_{DRM} = -V_M$$

5.2 Redressement double alternance par pont milieu

Fomesoutra.com
ça soutra
Docs à portée de main





$$V_1 = + V_M \sin \omega.t$$
$$V_2 = - V_M \sin t \ \omega.t$$

Pour $0 < \omega.t < \pi$

$V_1 > 0, V_2 < 0 \Rightarrow V_{A1} > V_M > V_{A2}$

$\Rightarrow V_{A1} > V_{K1} \Rightarrow D_1$ polarisation directe

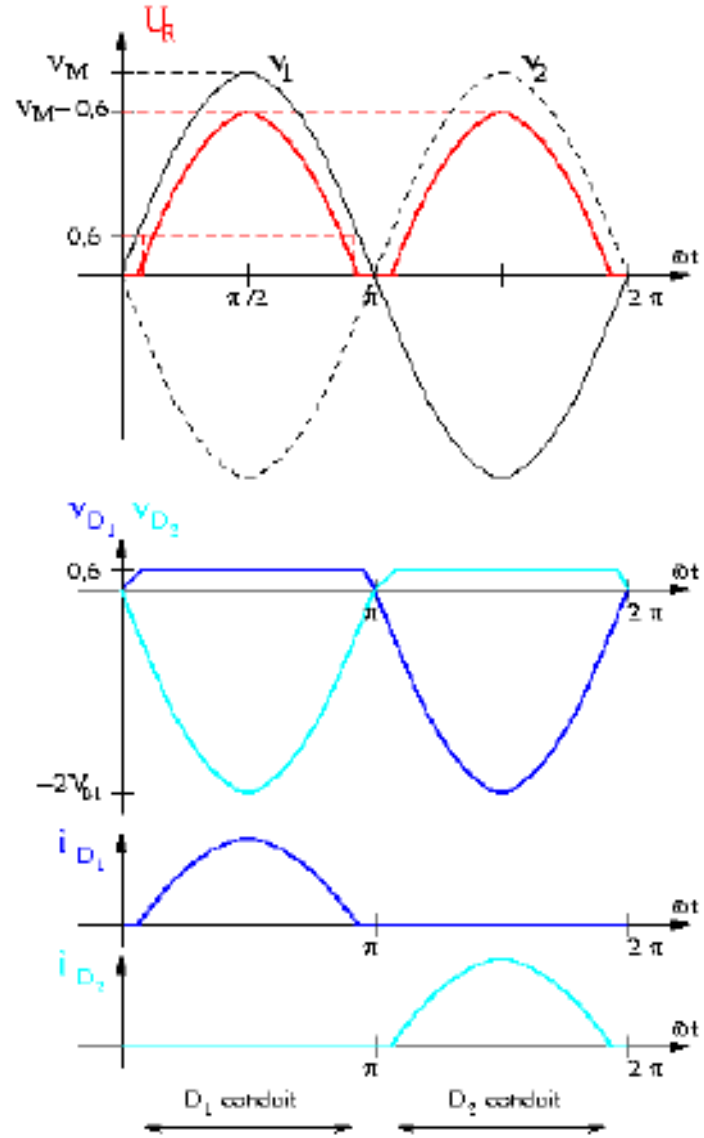
$\Rightarrow V_{A2} < V_{K2} \Rightarrow D_2$ polarisation inverse

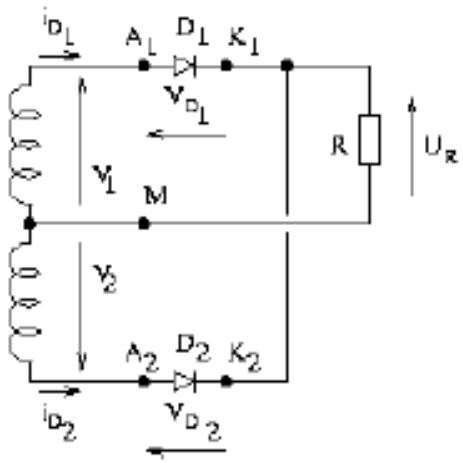
si $V_1 > 0{,}6$ V, D_1 conduit

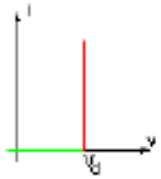
- $U_R = V_1 - V_{D1} = V_1 - 0{,}6$ et $i_R = U_R / R$
- $V_1 - V_{D1} + V_{D2} - V_2 = 0$

$\Rightarrow V_{D2} = V_2 - V_1 + V_{D1} \approx V_2 - V_1$

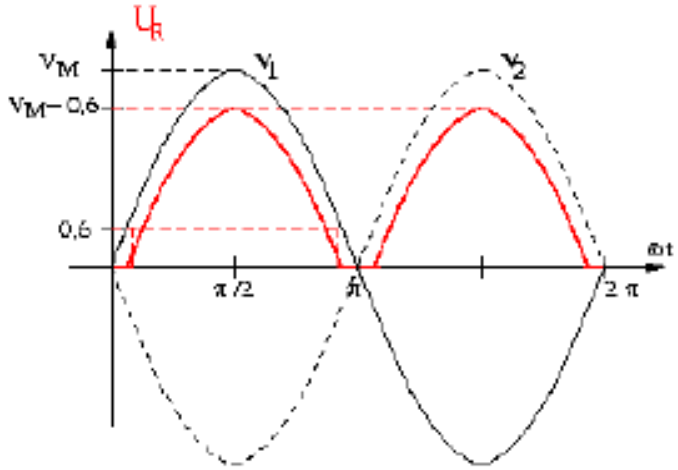
à $\omega.t = \pi/2$, $V_{D2} = -2V_M$







$$V_1 = + V_M \sin \omega.t$$
$$V_2 = - V_M \sin \omega.t$$



Pour $\pi < \omega.t < 2\pi$

$V_1 < 0, V_2 > 0 \Rightarrow V_{A1} < V_M < V_{A2}$

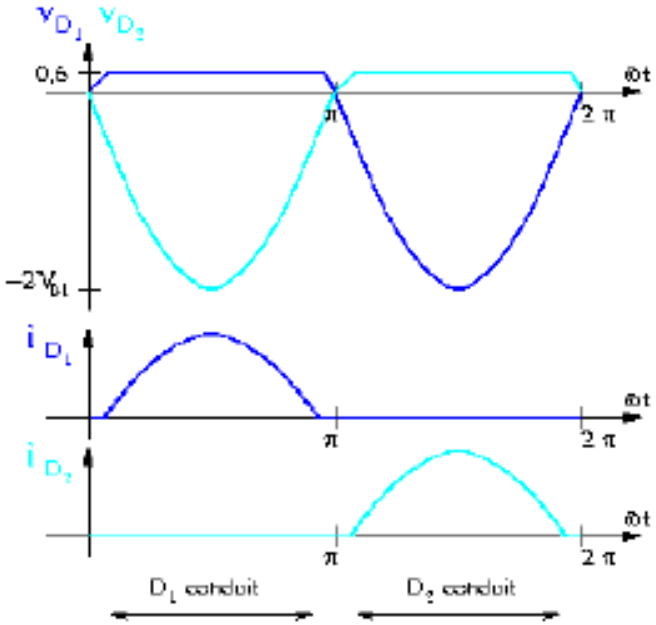
$\Rightarrow V_{A1} < V_{K1} \Rightarrow D_1$ polarisation inverse

$\Rightarrow V_{A2} > V_{K2} \Rightarrow D_2$ polarisation directe

si $V_2 > 0,6$ V, D_2 conduit

- $U_R = V_2 - V_{D2} = V_2 - 0,6$ et $i_R = U_R / R$
- $V_1 - V_{D1} + V_{D2} - V_2 = 0$

$\Rightarrow V_{D1} = V_1 - V_2 + V_{D2} \approx V_1 - V_2$



Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

valeurs moyennes

$$\overline{U_R} = \frac{1}{T/2}\int_{t_1}^{t_2} U_R(t)\,dt$$

$$\overline{U_R} \approx \frac{2}{T}\int_{0}^{T/2} V_M \sin(\omega \cdot t)\,dt = 2\frac{V_M}{\pi}$$

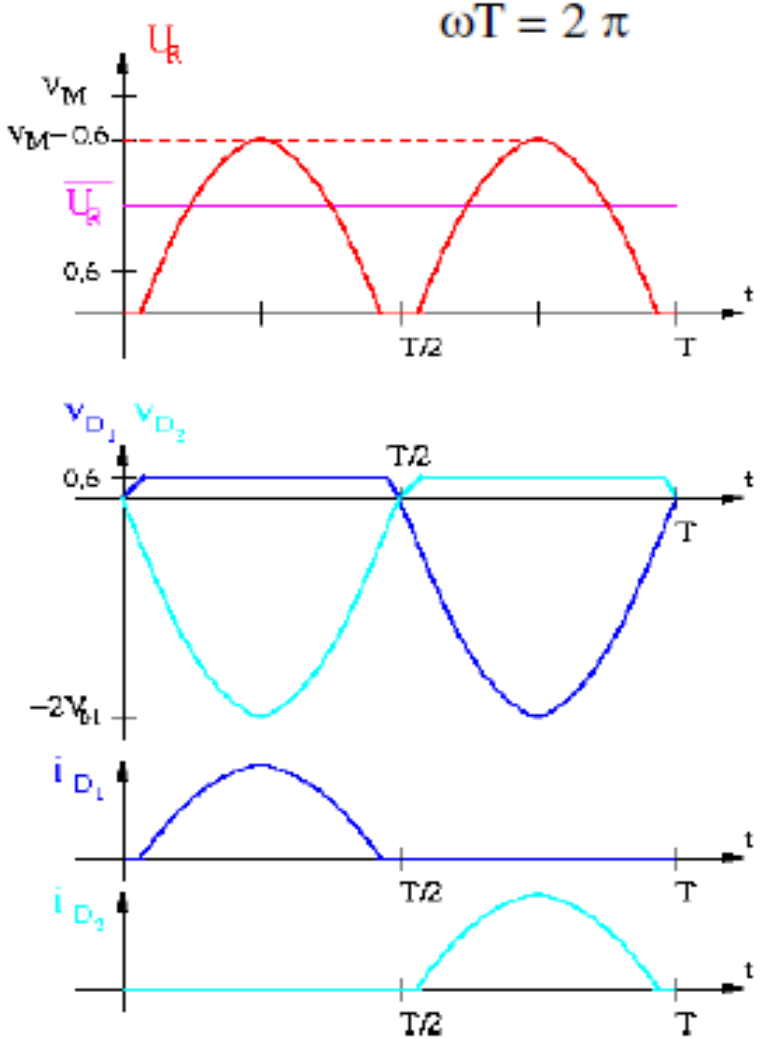
$$\overline{I_R} = \frac{\overline{U_R}}{R} = \frac{V_M}{\pi}\cdot\frac{2}{R} \qquad \overline{I_D} = \frac{V_M}{\pi}\cdot\frac{1}{R}$$

tension inverse maximale aux bornes de D

$$V_{DRM} = -2V_M$$

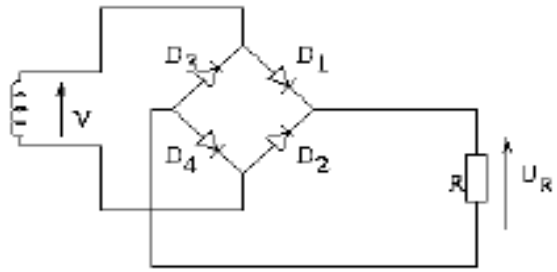
$\omega = 2\pi / T$

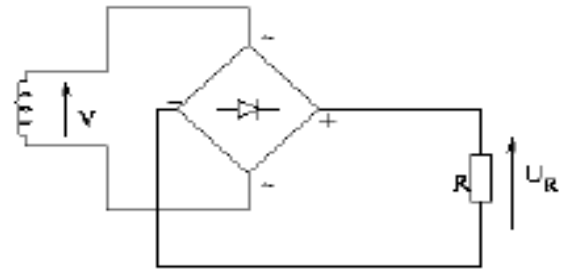
$\omega T = 2\pi$

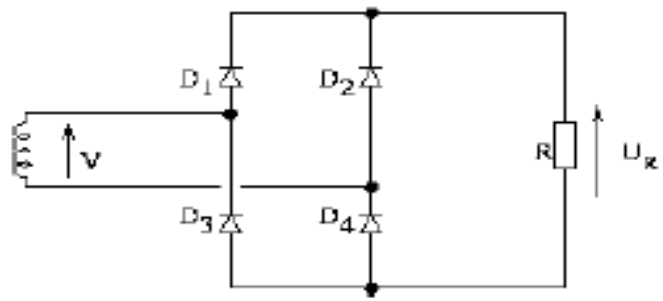


5.3 – *Redressement à pont de Graëtz*

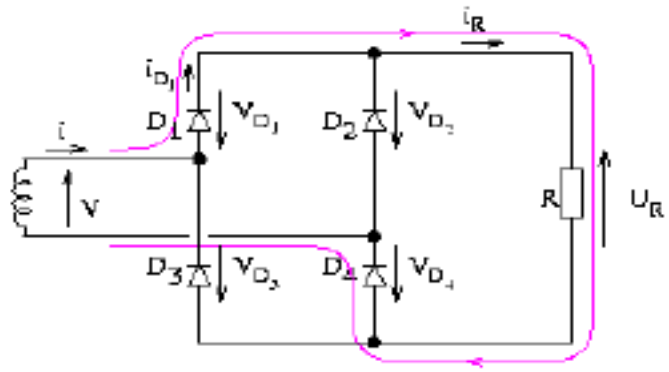
Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

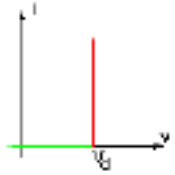




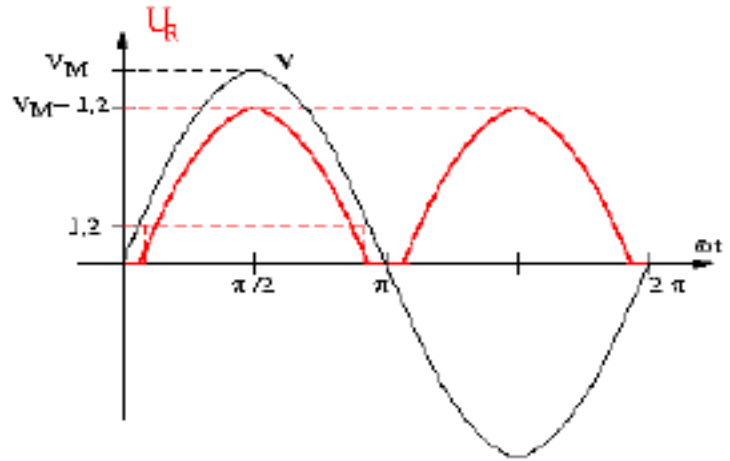


Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main





$$V = V_M \sin \omega.t$$

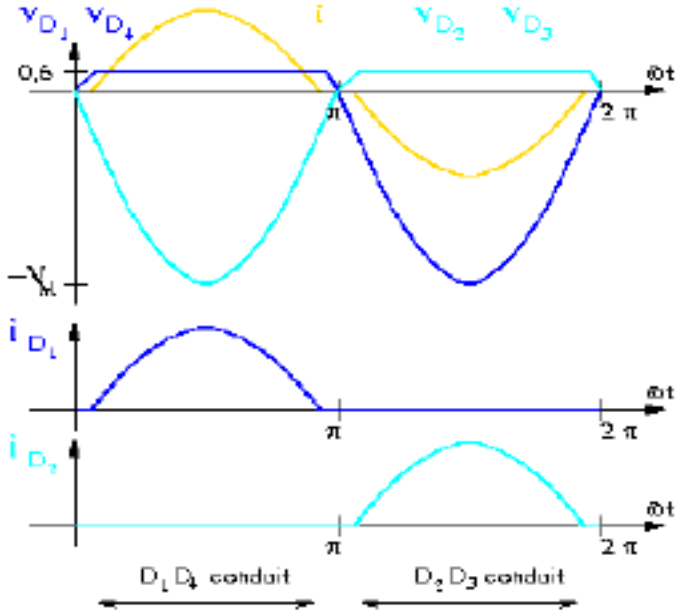


Pour $0 < \omega.t < \pi$

$$V > 0 \Rightarrow V_{A1} > V_{A2} \text{ ou } V_{K3} > V_{K4}$$

$$\Rightarrow \underbrace{V_{A1} > V_{K1}}_{D_1 \text{ pol. directe}} = \underbrace{V_{K2} > V_{A2}}_{D_2 \text{ pol. inverse}}$$

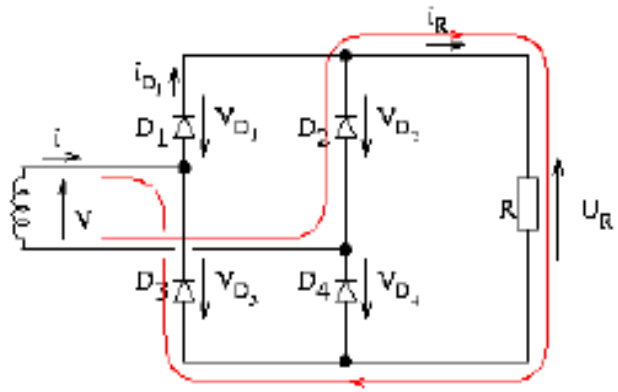
$$\Rightarrow \underbrace{V_{K3} > V_{A3}}_{D_3 \text{ pol. inverse}} = \underbrace{V_{A4} > V_{K4}}_{D_4 \text{ pol. directe}}$$

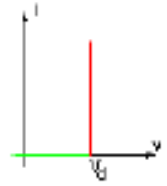


si $V > 2\,V_{seuil}$, D_1 et D_4 sont passantes

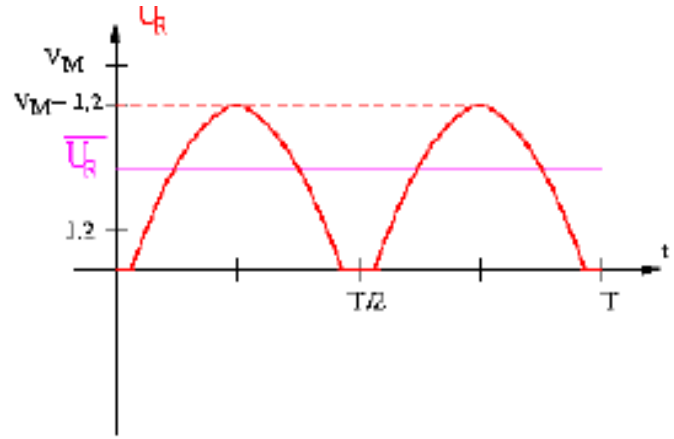
- $U_R = V - V_{D1} - V_{D4} = V - 1,2$ et $i_R = U_R / R$
- $V_{D2} = V_{D1} - V \approx -V$ et $V_{D3} = V_{D4} - V \approx -V$

Fomesoutra.com
ça soutra
Docs à portée de main





$$V = V_M \sin \omega.t$$

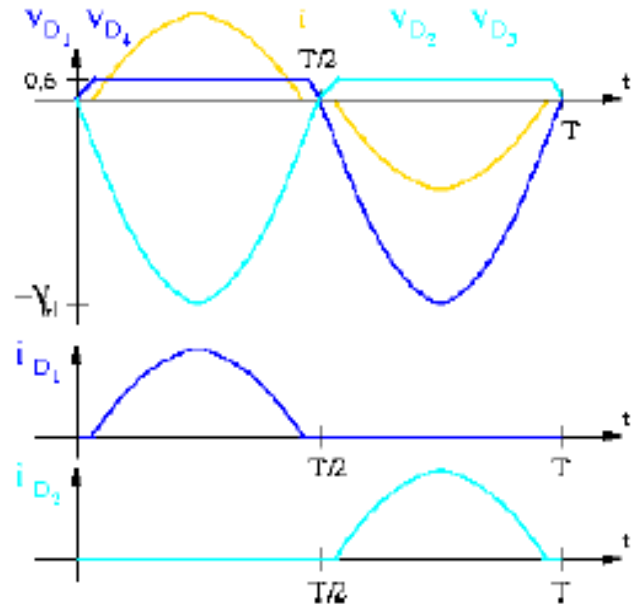


Pour $\pi < \omega.t < 2\pi$

$V < 0$

D_2 et D_3 polarisation directe

D_1 et D_4 polarisation inverse



valeurs moyennes

$$\overline{U_R} = 2\frac{V_M}{\pi}$$

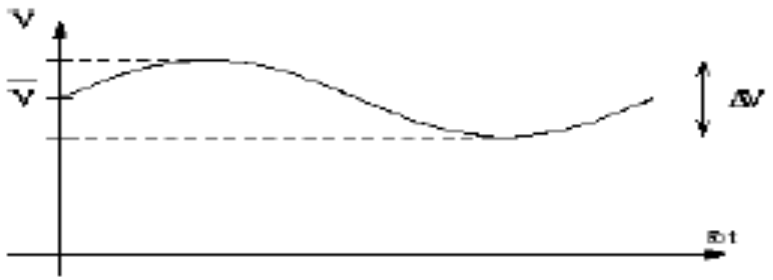
tension inverse maximale aux bornes de D

$$V_{DRM} = -V_M$$

5.4 Taux d'ondulation

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

Définition :



$$\tau = \frac{\Delta V}{\overline{V}}$$

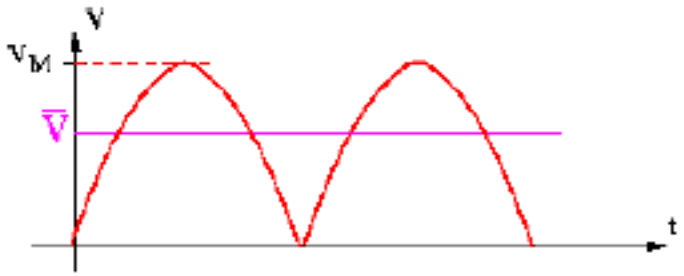
Redressement simple alternance :

$$\Delta V = V_M,\ \overline{V} = \frac{V_M}{\pi}$$

$$\tau = \frac{\Delta V}{\overline{V}} = \frac{V_M}{\frac{V_M}{\pi}} = \pi$$

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

Redressement double alternance :



$$\Delta V = V_M,\ \overline{V} = 2\frac{V_M}{\pi}$$

$$\tau = \frac{\Delta V}{\overline{V}} = \frac{V_M}{2\frac{V_M}{\pi}} = \frac{\pi}{2}$$

courant continu :

$$\Delta V = 0$$

$$\tau = 0$$

6 DIODE ZENER

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

6.1 Effet Zener

En polarisation inverse, dans certaines conditions, des électrons dans la bande de valence du côté P peuvent passer directement dans la bande de conduction du côté N, par un processus quantique appelé « effet tunnel ». Cet effet, donnant naissance à une augmentation du courant inverse, est appelé effet Zener.

6.2 Avalanche

L'effet d'avalanche est le mode de claquage le plus courant dans les diodes et dans les transistors.

Lorsqu'une forte tension inverse est appliquée aux bornes de la jonction, le champ électrique interne peut être tel que l'énergie cinétique acquise par les porteurs minoritaires soit suffisante pour créer des paires électrons-trous dans la zone de transition.
Ces nouveaux porteurs, après accélération par le champ interne peuvent à leur tour créer de nouvelles paires électrons-trous, d'où le nom d'avalanche donné au phénomène.
Le courant peut alors augmenter rapidement, et provoquer la destruction de la jonction par effet joule.

6.3 Caractéristique courant-tension

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

La Caractéristique courant-tension est donnée par la courbe suivante

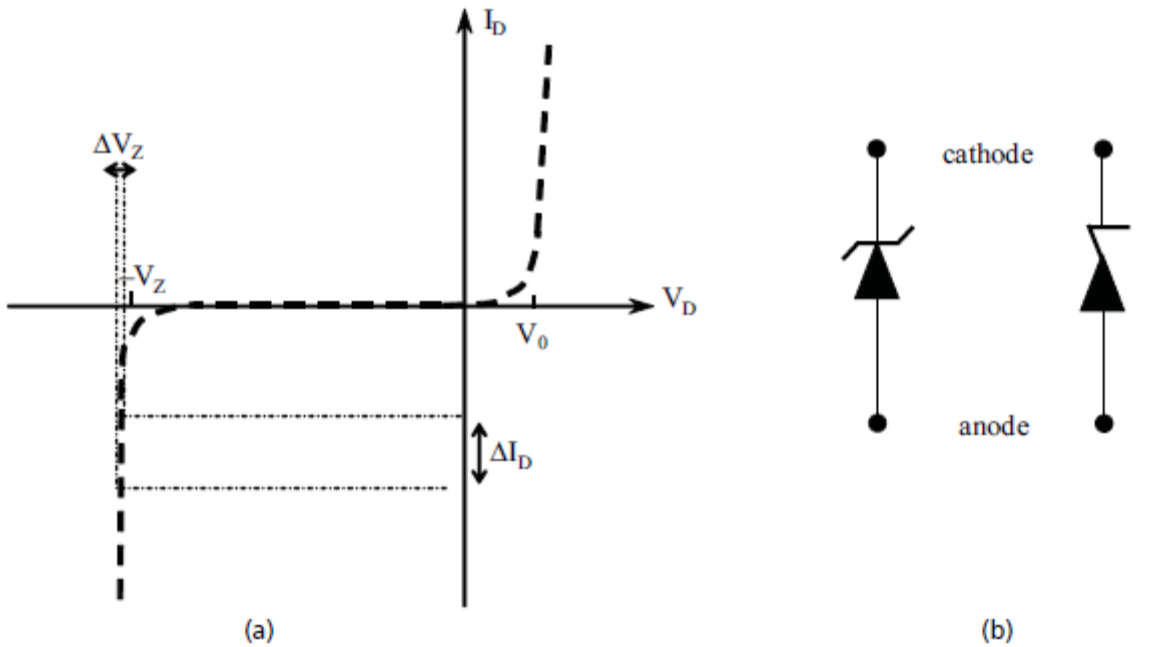


Figure 6.1 Caractéristique courant-tension (a) et symboles d'une diode Zéner (b).

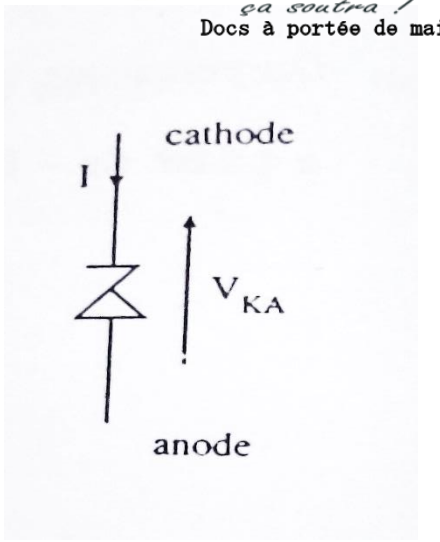
Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

On conçoit des diodes Zener spéciales pour obtenir, contrôler et garantir les paramètres souhaités :

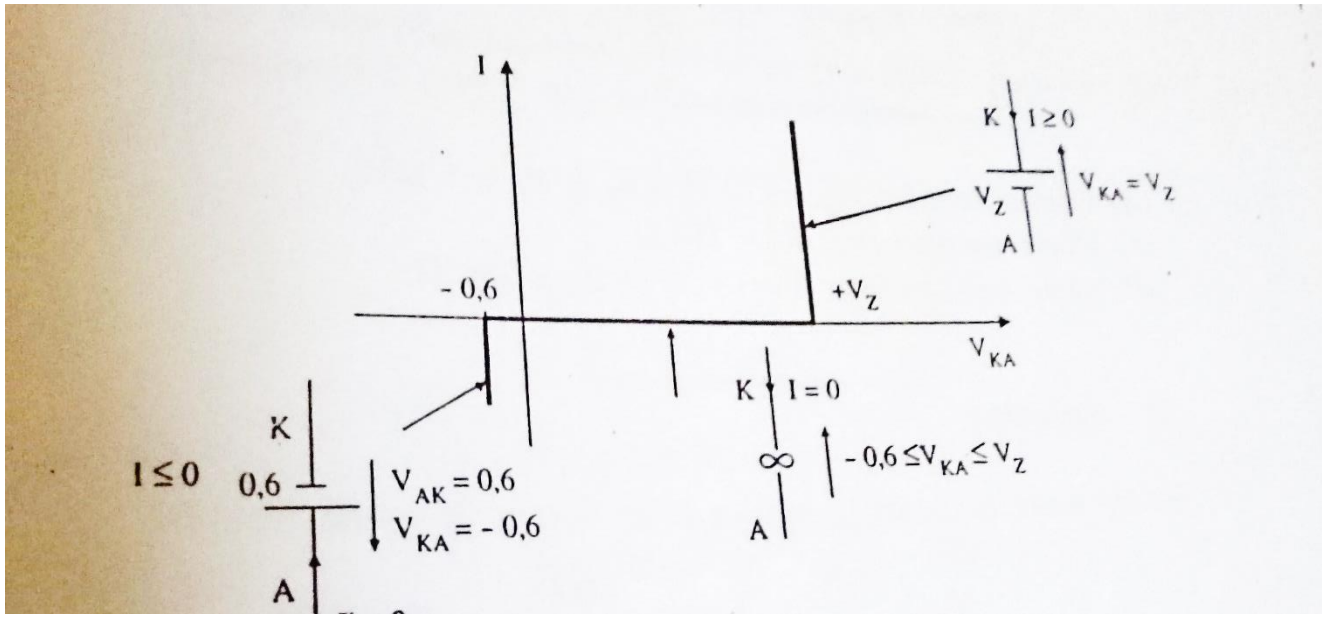
- la tension de claquage appelée souvent tension Zener Vz ;
- la résistance dynamique de claquage r_z appelée aussi *résistance Zéner* ;
- le courant minimal de la zone de claquage Iz_{min} ;
- le courant maximal de claquage Iz_{max}.

6.5 Modélisation de la diode Zéner

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main



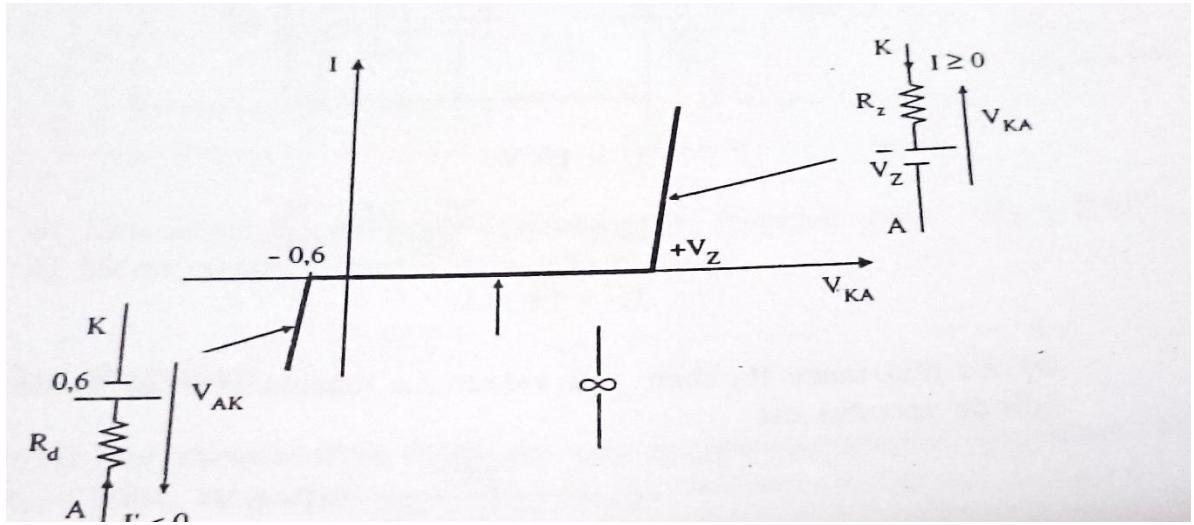
a) ***Caractéristique et modèle avec seuil (modèle 1)***



b) Caractéristique et modèle linéaire par morceaux(modèle 2)

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

On tient compte des résistances dynamiques



Méthode d'analyse des circuits comportant une diode Zener

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

Pour savoir si une diode Zener conduit on déconnecte celle-ci et on détermine la valeur de de la ddp à ses bornes de connexions. Si :

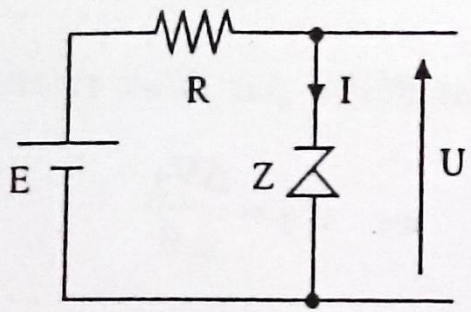
$V_{KA} > V_z$ la diode conduira en inverse,

$-0.6 \ll V_{KA} \ll V_z$ la diode sera non conductrice,

$V_{KA} < -0.6$ la diode conduira en direct et imposera une valeur de 0.6 V

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

☐ Exercice 1



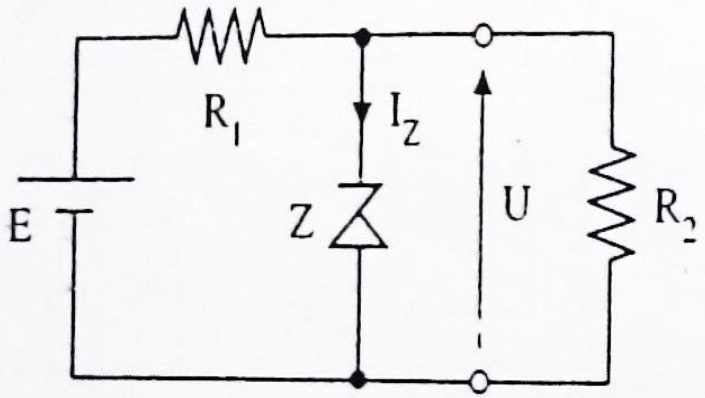
$E = 20\ V$
$R = 100\ \Omega$
$V_Z = 10\ V$, modèle 1

a) Quelles sont les valeurs de U et de I ?

b) Quelle est la puissance dissipée dans chaque composant ?

Fomesoutra.com
ça soutra !
Docs à portée de main

☐ Exercice 2



$E = 30$ V
$V_z = 10$ V, modèle 1
$R_1 = 1$ kΩ

a) Quelles sont les valeurs de U et I_Z si $R_2 = 1$ kΩ ?
b) Même question pour $R_2 = 250$ Ω.
c) Même question pour E inversée et $R_2 = 250$ Ω.