

Licence Commande Automatique : S5

Cours Electronique de Puissance

CHAP II. Le Redressement non commandé

Ce cours est à usage strictement didactique

Bibliographie :

Les convertisseurs de l'Electronique de Puissance, Guy SEGUIER,

Les quatre volumes

Enseignant : Kifouche Rezki

Département Automatisation et Electrification

FHC, UMBB

II. Le Redressement Non Commandé

II.1 Définitions :

Les redresseurs sont des convertisseurs de l'électronique de puissance. Ils permettent d'obtenir un courant unidirectionnel de la tension d'une source alternative. On les appelle, communément, des convertisseurs AC/DC. On retrouve des redresseurs non commandés, constitués uniquement de diodes, et on retrouve aussi des redresseurs commandés qui doivent contenir des composants commandables que sont les thyristors.

On classe, aussi, les redresseurs selon le nombre d'alternances et le nombre de phases. On retrouve donc :

- Des redresseurs mono-alternance monophasé non commandés.
- Des redresseurs mono-alternance monophasé commandés.
- Des redresseurs double alternance monophasé non commandés.
- Des redresseurs double alternance monophasé commandés.
- Des redresseurs mono-alternance triphasé non commandés.
- Des redresseurs mono-alternance triphasé commandés.
- Des redresseurs double alternance triphasé non commandés.
- Des redresseurs double alternance triphasé commandés.

On plus de ce classement très exhaustif, on retrouve aussi, parmi les redresseurs à double alternance commandés, des plein thyristors et des mixtes (thyristors + diode).

On utilise des redresseurs non-commandés quand on n'a pas besoin d'une tension de sortie variable en valeurs moyenne.

On utilise des redresseurs commandés quand on a besoin d'une tension de sortie variable en valeurs moyenne. On obtient la variation de la tension moyenne par l'action sur l'angle d'amorçage des thyristors.

On peut représenter les redresseurs par la figure ci-dessus, si le redresseur n'est pas commandable, la valeur moyenne de la tension de sortie est constante sinon, s'il est commandable, la valeur de sortie est variable.

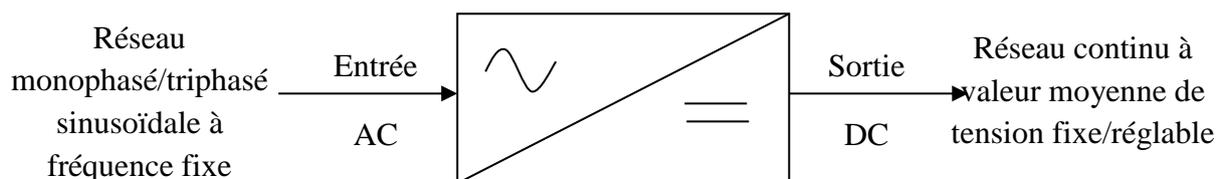


Fig.II.1 représentation des redresseurs

II.2 Redresseur monophasé simple alternance non commandé :

II.2.1 Débit sur une charge résistible :

Pour un redresseur monophasé simple alternance, on a besoin d'une seule diode pour sa réalisation. Le montage ci-contre représente ce montage, dans sa plus simple expression.

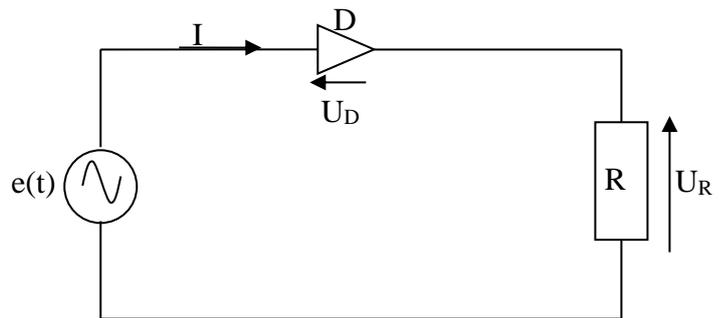


Fig.II.2 Redresseur monophasé simple alternance NC

II.2.1.1 Analyse du fonctionnement :

La diode D est bloquée quand le courant s'annule et elle conduit quand le courant est positif. Le courant I est redressé. Quand la diode conduit, la tension de la source se retrouve, en grande partie, aux bornes de la résistance alors qu'une petite chute de tension apparaîtra aux bornes de la diode.

Lors de l'étude du circuit, le calcul des chutes de tension s'effectue en se basant sur un modèle de la diode. Si on considère que la diode est idéale, quand cette dernière conduit la tension de la source est représentée entièrement aux bornes de la résistance.

II.2.1.2 Représentation de l'évolution de la tension et du courant :

La tension en fonction du temps aux bornes de la diode et de la résistance se présente comme suit, et cela en s'appuyant sur le modèle de la diode idéale (on a utilisé $e(t)$ très faible '2V' pour faire apparaître V_j et U_{RD} , avec $V_j=0,6V$) :

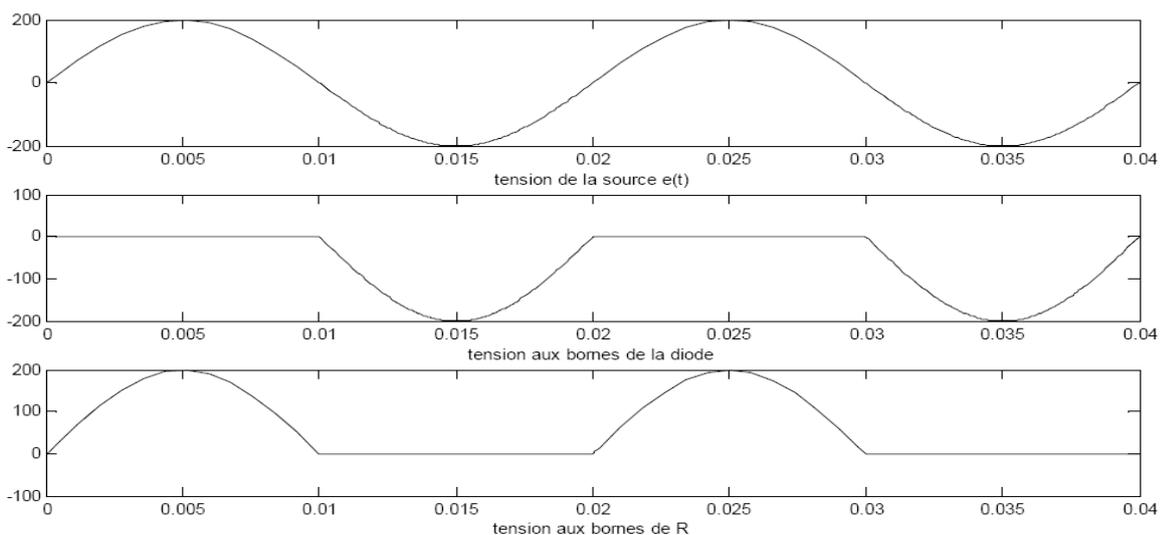


Fig.II.2-a L'évolution de la tension dans le cas d'une diode idéale

- En utilisant sur le modèle de la diode avec seuil :
En considérant que $V_j = 0,6V$:

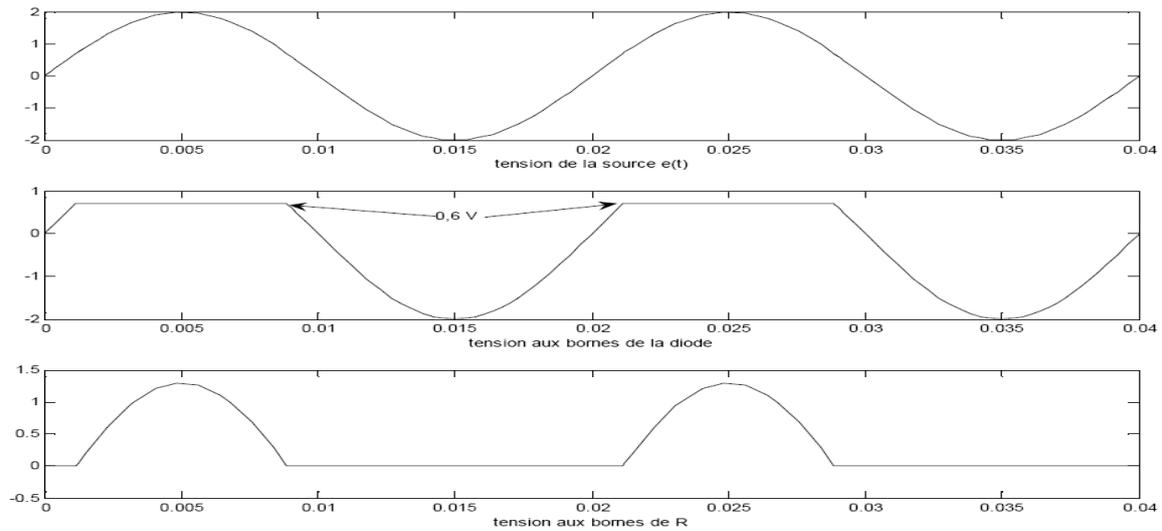


Fig.II.2-b L'évolution de la tension dans le cas d'une diode avec seuil

- En utilisant sur le modèle de la diode avec seuil et résistance :
En considérant que $V_j = 0,6V$:

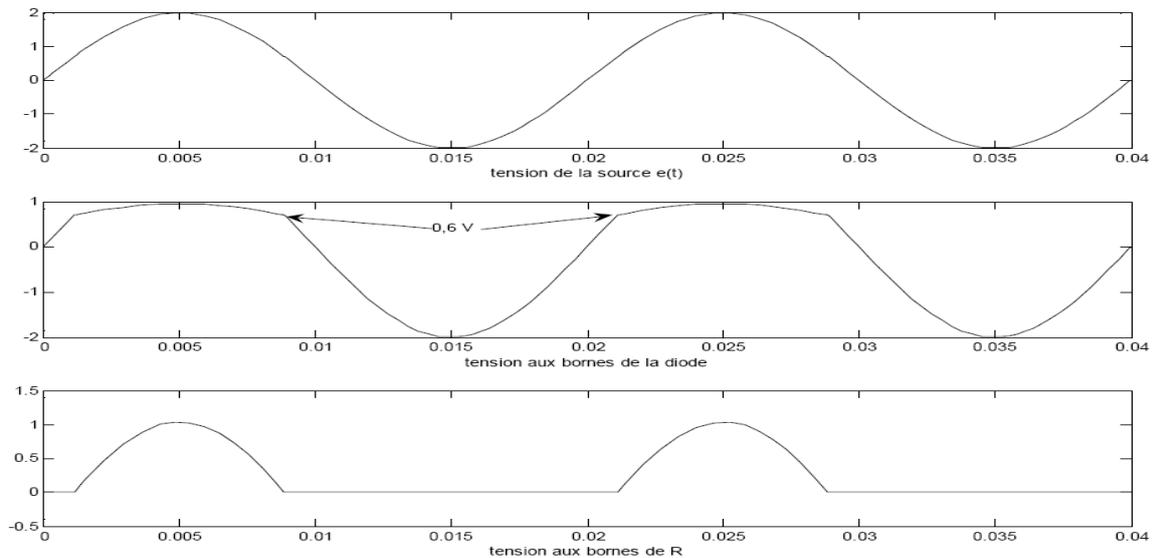


Fig.II.2-c L'évolution de la tension dans le cas d'une diode avec seuil et résistance

NB : pour tracer les courbes, si on a considéré une tension de la source $e(t)$ très faible, c'est dans l'objectif de faire apparaître l'effet de V_j et de U_D .

A chaque fois, pour le circuit représenté par la figure fig.II.2, on a :

$$E(t) = U_R + U_D$$

Quand la diode conduit :

- Pour une diode idéale, on a : $U_D=0$.
- Pour une diode avec seuil, on a : $U_D=V_j$
- Pour une diode avec seuil et résistance, on a : $U_D= V_j+R_D.I$

Quand la diode ne conduit pas :

- $U_D = E(t)$
- $U_R = 0$

L'évolution du courant dans le circuit est exactement à l'image de la tension redressée aux bornes de la résistance R.

II.2.1.2 La valeur moyenne de la tension redressée :

Dans le cas d'une diode parfaite. La tension redressée prend la valeur de la tension de la source quand la diode conduit (car $V_j=0$ et $R_D=0$).

Si la tension de la source est donnée par :

$$e(t) = E_{max}\sin(\omega t) \text{ de période } 2\pi, \text{ de } 0 \text{ à } 2\pi.$$

La diode conduit lors de l'alternance positive, donc, la tension redressée aux bornes de la résistance est :

$$U_{red} = e(t) \text{ pour } \omega t \in [0, \pi]$$

$$\text{Et } U_{red} = 0 \text{ pour } \omega t \in [\pi, 2\pi]$$

Donc :

$$U_{red_moy} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{red} d\theta \text{ avec } \theta = \omega t.$$

$$U_{red_moy} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{red} d\theta = \frac{E_{max}}{2\pi} \int_0^{\pi} \sin\theta. d\theta$$

$$U_{red_moy} = \frac{E_{max}}{2\pi} \cdot (-\cos\theta)|_0^{\pi} = \frac{E_{max}}{\pi}$$

$$U_{red_moy} = \frac{E_{max}}{\pi}$$

II.2.1.3 La valeur efficace de la tension redressée :

La tension efficace est donnée par :

$$U_{red_eff}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U_{red}^2 d\theta$$

$$U_{red_eff}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{red}^2 d\theta = \frac{E_{max}^2}{2\pi} \int_0^\pi \sin^2 \theta \cdot d\theta$$

$$U_{red_eff}^2 = \frac{E_{max}^2}{4\pi} \int_0^\pi 1 - \cos 2\theta \cdot d\theta$$

$$U_{red_eff}^2 = \frac{E_{max}^2}{4\pi} \left[\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right]_0^\pi = \frac{E_{max}^2}{4\pi} \cdot \pi = \frac{E_{max}^2}{4}$$

$$U_{red_eff} = \frac{E_{max}}{2}$$

Le taux d'ondulation de la tension aux borne de la charge est :

$$\Delta U_{red} = E_{max} - 0 = E_{max}$$

Donc, le taux d'ondulation pour un redresseur mono-alternance débitant sur une charge résistive est à 100% de E_{max}

NB :

On calcule le courant moyen et efficace avec la même méthode.

II.2.2 Débit sur une charge résistible avec lissage de la tension, charge RC :

Pour le lissage de la tension, on place une capacité en parallèle avec la résistance (la charge).

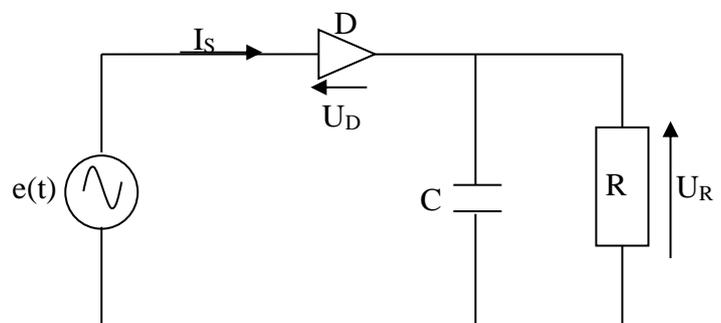


Fig.II.3. Redresseur mono-alternance avec lissage de la tension

II.2.2.1 Analyse de fonctionnement du circuit :

Le redresseur, quand la diode conduit, va en même temps charger la capacité et alimenter la charge. Quand la tension redressée baisse, la diode va se bloquer à l'instant où la tension aux bornes de la capacité devient supérieure à celle de la source. A cette instant, c'est la capacité qui va se décharger sur la résistance jusqu'à ce que de nouveau la tension de la source redevient, lors de l'alternance suivante, encore supérieure à celle de la capacité, qui va recommencer à se recharger.

Le taux d'ondulation va s'améliorer. Très souvent, ce dernier est fixé au préalable, ce qui nous amène à choisir ou à calculer la valeur de la capacité qui permet de maintenir le taux d'ondulation dans les valeurs admises.

II.2.2.2 Représentation de l'évolution de la tension et du courant :

La figure ci-dessous représente l'évolution de la tension de la source puis celle aux bornes de la capacité qui elle-même. On constate que la capacité se charge quand sa tension est inférieure à celle de la source et puis, elle se déchargera sur la résistance une fois sa tension passe au-dessus de la tension sinusoïdale de la source, quand cette dernière décroît de sa valeur maximale.

La Source débite seulement quand la diode conduit. Et cette dernière ne conduit que quand elle est polarisée positivement, donc quand la tension de la source est supérieure à celle de la capacité.

Admettant qu'à l'état initial, la capacité est totalement déchargée, donc lors du premier rechargement, le courant sera plus important que lors des autres recharges qui vont suivre.

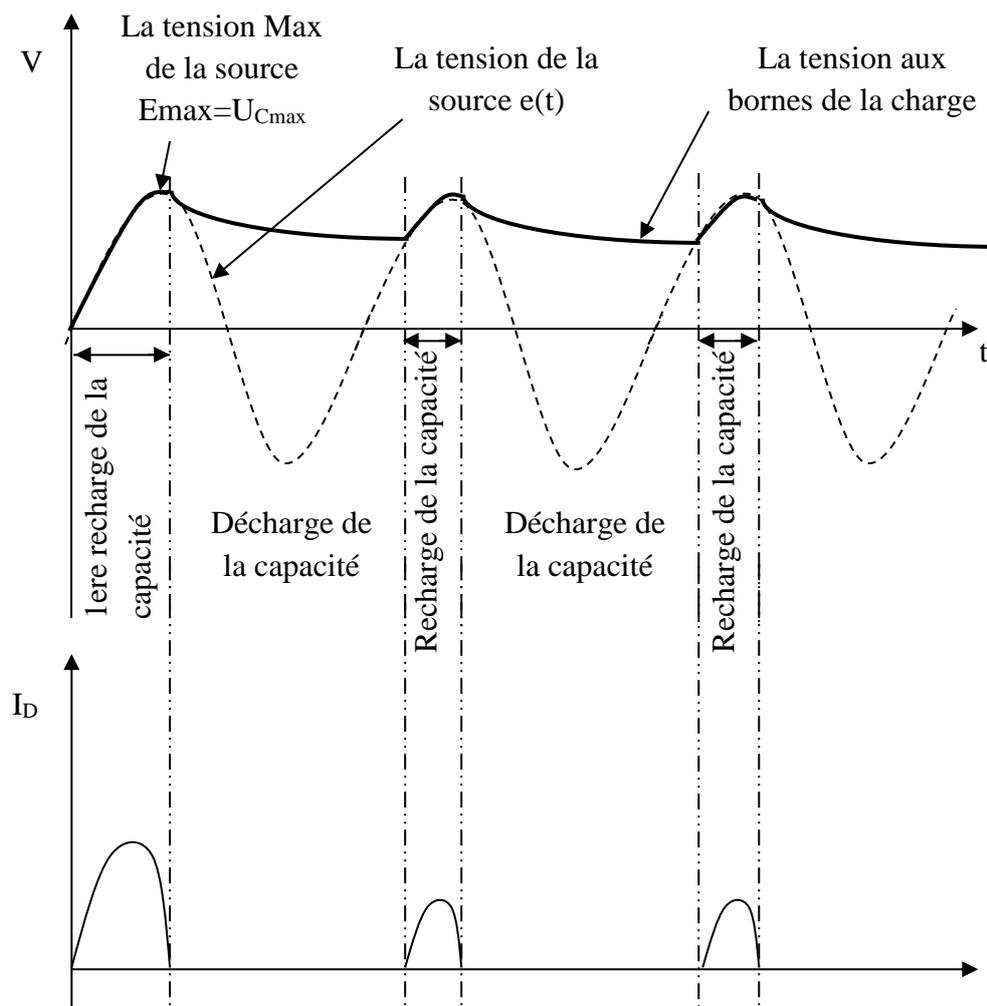


Fig.II.4 Evolution de la tension de la source, de la capacité et le courant de la source pour redresseur monophasé avec lissage de la tension

Pour l'évolution du courant dans la résistance, elle est à l'image de la tension aux bornes de la capacité. Quand la capacité se charge, le courant dans la résistance provient de la source.

II.2.2.3 II.2.1.2 La valeur moyenne de la tension redressée :

Pour le calcul de la valeur moyenne et efficace de la tension de sortie, on procède à sa simplification en l'assimilant à une succession de rampes décroissantes dont la pente dépend de des valeur de la résistance de la charge et de la capacité. La pente est définie par rapport à la constante du temps τ . Avec $\tau = RC$. L'expression de la tension aux bornes de la résistance U_R et de la capacité U_C est elle-même la tension de sortie U_S , elle est donnée par :

$$U_R = U_C = U_S = E_{max} \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)$$

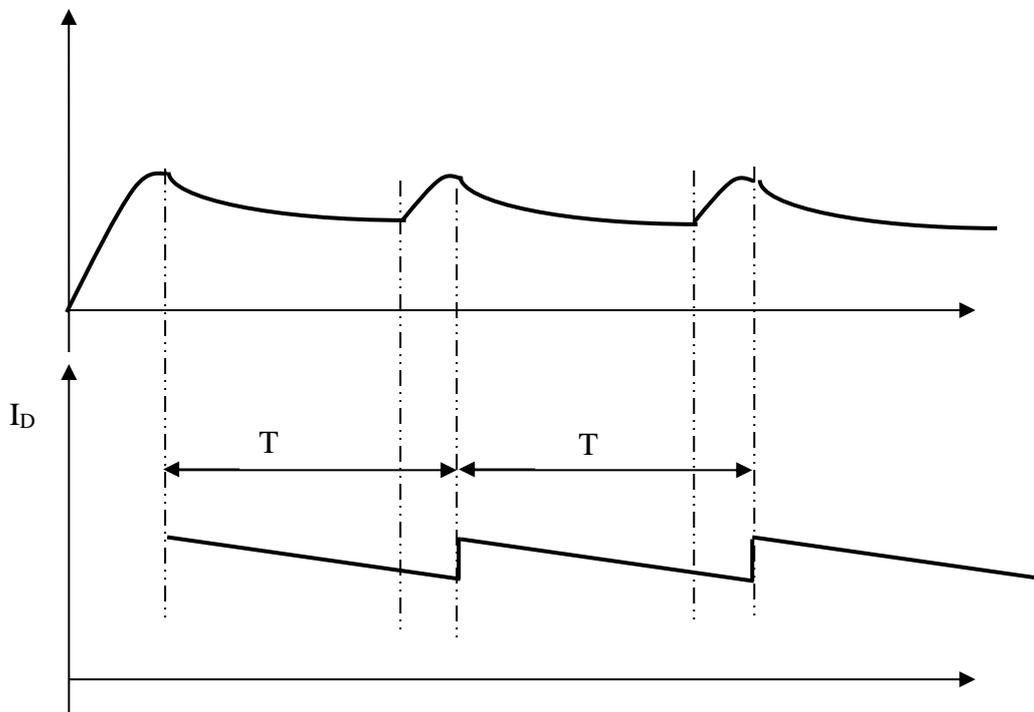


Fig.II.5 Simplification de la tension de sortie d'un redresseur monophasé simple
alternance avec lissage de la tension

Pour le calcul de la valeur moyenne, on peut procéder par le calcul de l'intégrale de la fonction qui exprime l'évolution de la tension U_S en considérant l'origine du temps comme l'instant pour lequel U_S prend la valeur max. Ou, parce que la U_S est une droite, on calculant :

$$U_{Smoy} = \frac{U_{Smax} + U_{Smin}}{2}$$

Sachant que la tension U_S va prendre sa valeur min pour $t=T$, selon la figure figII.5, donc :

$$U_{Smax} = E_{max}$$

$$U_{Smin} = E_{max} \left(1 - \frac{T}{\tau}\right)$$

On calcul U_{Smoy} :

$$U_{Smoy} = \frac{U_{Smax} + U_{Smin}}{2} = \frac{1}{2} \left(E_{max} + E_{max} \left(1 - \frac{T}{\tau}\right) \right)$$

$$U_{Smoy} = \frac{1}{2} E_{max} \left(1 + \left(1 - \frac{T}{\tau}\right) \right)$$

$$U_{Smoy} = E_{max} \left(1 - \frac{T}{2\tau}\right)$$

Comme $\tau = RC$ et $T=1/f$

On écrire :

$$U_{Smoy} = E_{max} \left(1 - \frac{1}{2RCf}\right)$$

II.2.2.4 II.2.1.2 La valeur efficace de la tension redressée :

Pour le calcul de la valeur efficace, on considère les mêmes simplifications que pour le calcul de la valeur moyenne. Et on écrit :

$$U_{Seff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T \left(E_{max} \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) \right)^2 dt$$

$$U_{Seff}^2 = \frac{E_{max}^2}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)^2 dt$$

$$U_{Seff}^2 = E_{max}^2 \left(1 - \frac{T}{\tau} + \frac{T^2}{3\tau^2}\right)$$

Donc, on peut écrire :

$$U_{Seff} = E_{max} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{RCf} + \frac{1}{3 \cdot (RCf)^2}}$$

II.2.3 Débit sur une charge résistible avec lissage du courant, charge RL :

Le montage d'une inductance en série avec la charge résistive, permet de lisser le courant et pour éviter l'apparition de tensions négatives aux bornes de la charge, il faut aussi placer une diode de roue libre en parallèle avec cette dernière.

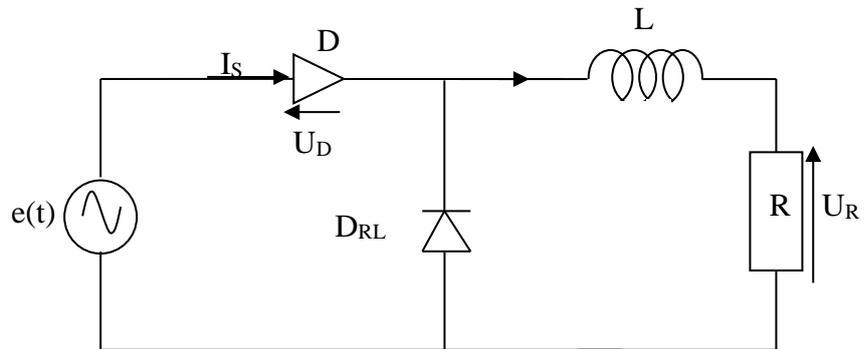


Fig.II.3. Redresseur mono-alternance avec lissage du courant

II.2.3.1 Analyse de fonctionnement du circuit :

- **Sans diode de roue libre :**

Sans la diode de roue libre D_{RL} le courant qui est déphasé de la tension (il est en retard) va poursuivre son passage à travers la diode même si la tension de la source devient négative (la diode est polarisée en inverse). Cela va provoquer l'apparition d'une tension négative aux bornes de la charge (la résistance et l'inductance) voir figure fig.II.4

- **Avec diode de roue libre :**

La diode de roue libre sera traversée par le courant résiduel emmagasiné dans la bobine. Ce qui fait que la tension négative de la source n'a plus de raison d'être. A l'instant où cette dernière apparaîtra, c'est la diode de roue libre qui va conduire ce qui va bloquer la diode de redressement.

Donc la diode de roue libre va conduire quand la tension de la source devient négative et elle sera traversée par le courant emmagasiné dans la bobine. Voir la figure fig.II.5

II.2.3.2 Représentation de l'évolution de la tension et du courant :

Ayant une charge inductive, le courant est en retard par rapport à la tension. La diode de redressement va se bloquer quand le courant s'annule pour le circuit sans diode de roue libre. Avec cette dernière, la diode va se bloquer quand la tension s'annule.

Et elle ne redeviendra conductrice que quand la tension de la source est positive. Voir la figure fig.II.5

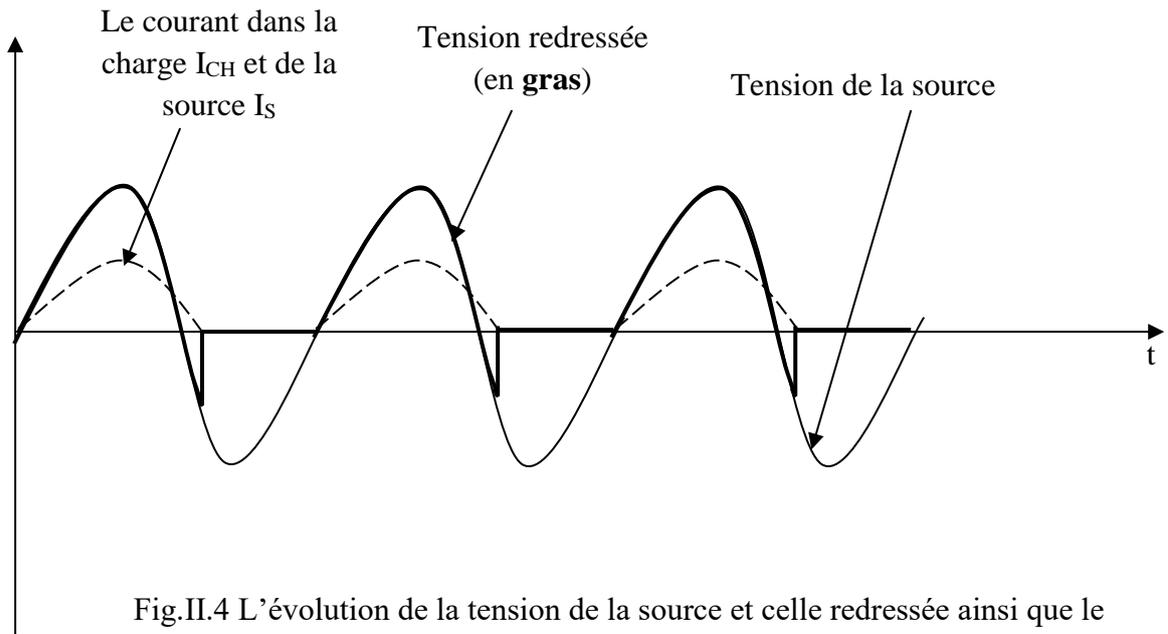


Fig.II.4 L'évolution de la tension de la source et celle redressée ainsi que le courant pour une charge inductif **sans** diode de roue libre

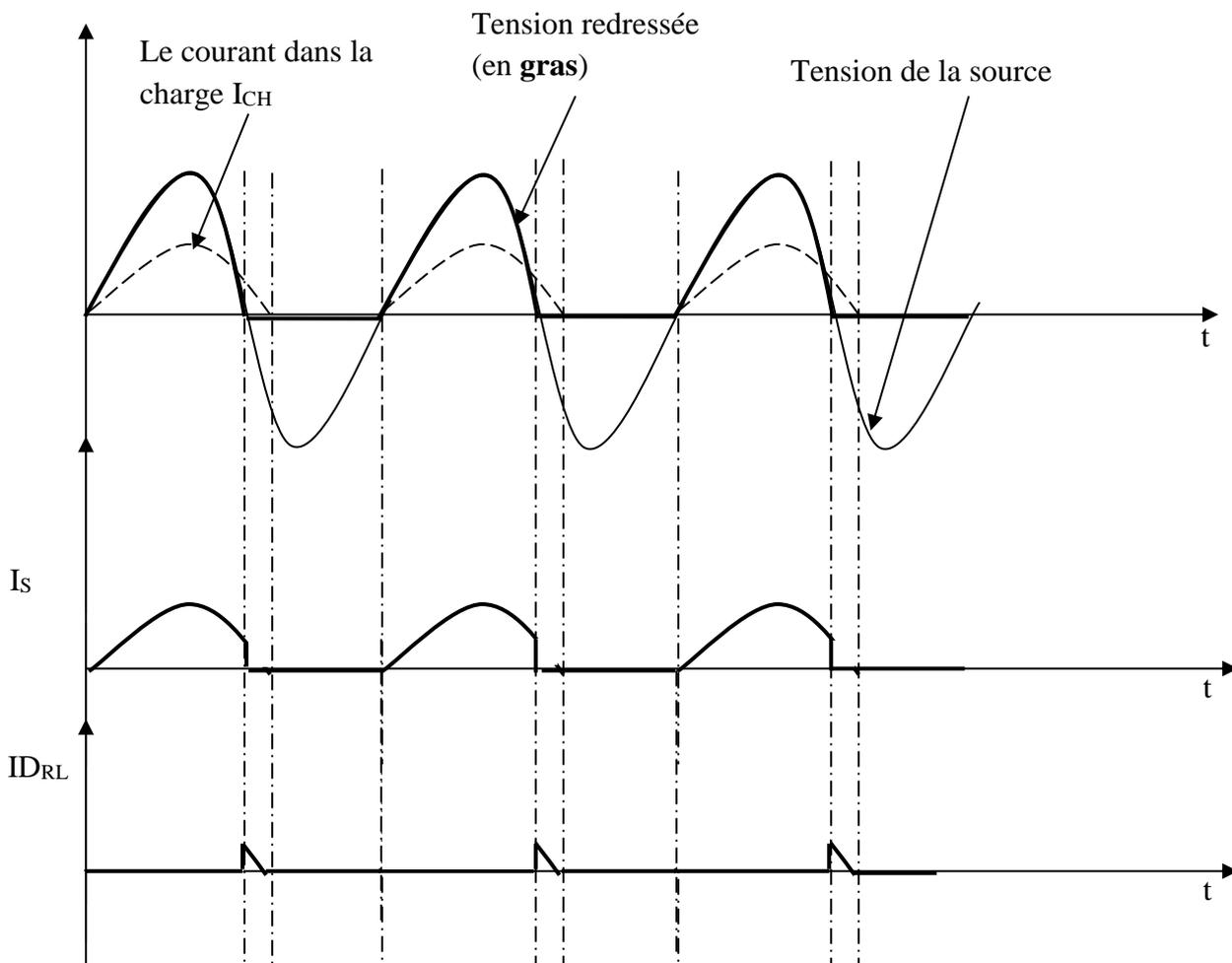


Fig.II.4 L'évolution de la tension de la source et celle redressée ainsi que le courant pour une charge inductif **avec** diode de roue libre

Sans la diode de roue libre, le courant dans la charge est le même que celui dans la source. Avec la diode de roue libre, il y aura un courant qui va circuler à travers cette dernière, c'est I_{DRL} , de telle sorte à ce que I_{CH} , le courant dans la charge soit égal à la somme de I_S et de I_{DRL} , le courant dans la source et dans la diode de roue libre.

Avec la diode de roue libre, la tension négative aux bornes de la charge disparaît. Le courant emmagasiné dans l'inductance de la charge et qui devrait forcer son passage à travers la diode de redressement, va donc circuler à travers la diode de roue libre. La tension aux bornes de la charge va se réduire à la tension aux bornes de la D_{RL} .

II.3 Redresseur double alternance monophasé non commandé :

II.3.1 Débit sur une charge résistive :

On obtient un redresseur double alternance soit à l'aide d'un transformateur à point milieu, ou avec un montage en pont.

II.3.1.1 Montage à point milieu :

Dans ce type de montage, on utilise des transformateurs dont le secondaire dispose d'un point milieu. Ce dernier permet de disposer de deux tensions en opposition de phase.

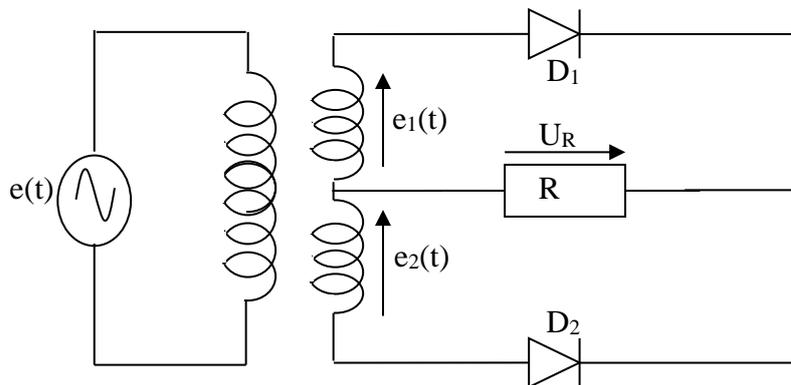


Fig.II.4 Redresseur double pont, montage point milieu

- **L'évolution des tensions dans un redresseur double alternance à point milieu**

Dans un redresseur double alternance à point milieu, on dispose de deux tensions ($e_1(t)$ et $e_2(t)$) avec une amplitude $e_{1max} = e_{2max} = 1/2 e_{max}$. Les diodes D_1 et D_2 vont jouer le rôle de redresseur mono-alternance pour chacune des deux tensions $e_1(t)$ et $e_2(t)$.

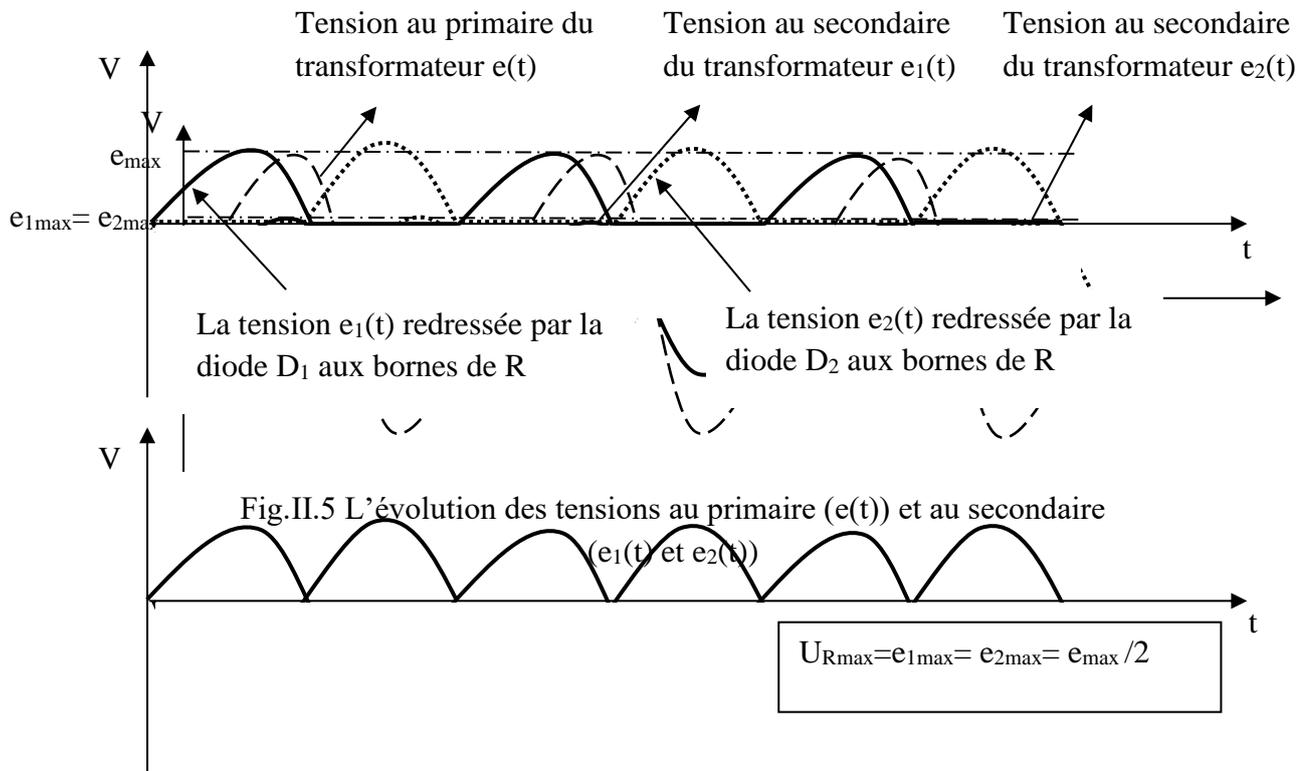


Fig.II.6 La tension redressée aux bornes de la résistance R pour Redresseur double alternance à point milieu

La résistance (la charge) va avoir une tension à ses bornes pour les deux alternances positive et négative de la tension d'alimentation, la tension au primaire du transformateur. La tension est

périodique, sa période est la moitié de la période de la tension au primaire du transformateur $e(t)$.

II.3.1.2 Montage en pont :

Appeler aussi pont de Graëtz, et c'est une autre manière de faire du redressement double alternance, ne nécessitant pas de transformateur. On utilise 4 diodes montées en pont.

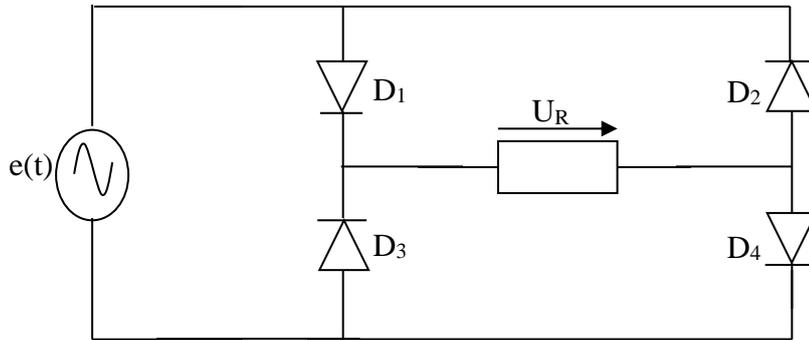


Fig.II.6 Redresseur double alternance, montage en pont

▪ L'évolution des tensions dans un redresseur double alternance, montage à pont :

La différence entre un redresseur double alternance à montage point milieu et à montage à pont est la valeur de la tension maximale redressée. La valeur de la tension maximale redressée pour le montage à pont est le double de celle des montages à point milieu pour une même tension d'alimentation.

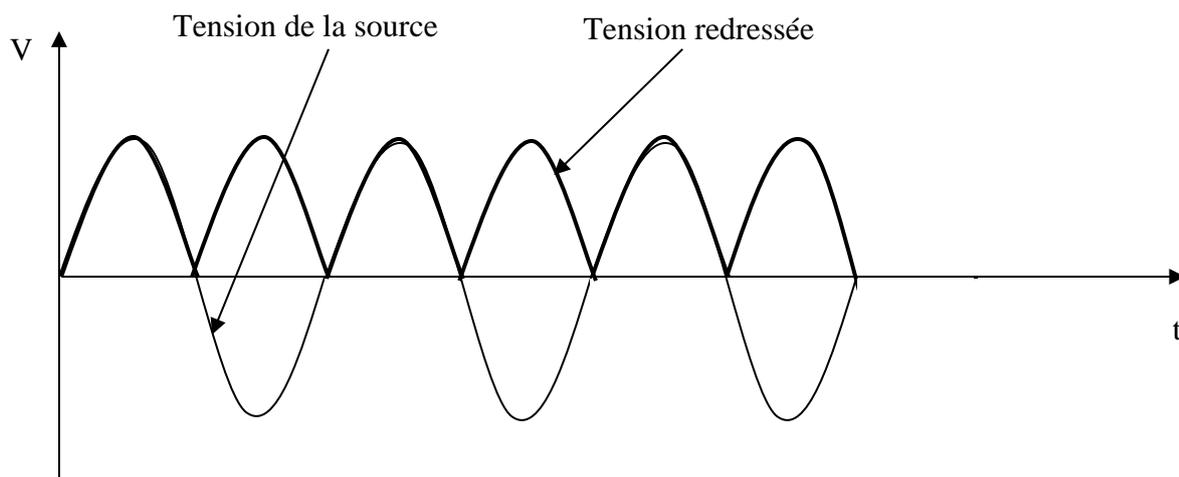


Fig.II.7 L'évolution de la tension de la source et de celle redressée pour un redresseur double alternance, montage à pont

II.3.1.3 II.2.1.2 La valeur moyenne de la tension redressée :

Pour un redresseur double alternance, montage à pont, on à la période de la tension redressée qui est égale à la moitié de tension obtenue par les redresseur simple alternance. Donc, la méthode de calcul reste la même. Il suffit de changer la période qui passe de 2π à π .

Donc, avec $\theta=wt$, on écrit :

$$U_{red_moy} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{red} d\theta = \frac{E_{max}}{\pi} \int_0^{\pi} \sin\theta. d\theta$$

$$U_{red_moy} = \frac{E_{max}}{\pi} \cdot (-\cos\theta)|_0^{\pi} = \frac{2 \cdot E_{max}}{\pi}$$

$$U_{red_moy} = \frac{2 \cdot E_{max}}{\pi}$$

II.3.1.4 La valeur efficace de la tension redressée :

Pareil pour la tension efficace. Donc cette dernière est donnée par :

$$U_{red_eff}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} U_{red}^2 d\theta = \frac{E_{max}^2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin^2\theta. d\theta$$

$$U_{red_eff}^2 = \frac{E_{max}^2}{2\pi} \int_0^{\pi} 1 - \cos 2\theta. d\theta$$

$$U_{red_eff}^2 = \frac{E_{max}^2}{2\pi} \left[\theta - \frac{1}{2} \sin 2\theta \right]_0^{\pi} = \frac{E_{max}^2}{2\pi} \cdot \pi = \frac{E_{max}^2}{2}$$

$$U_{red_eff} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}$$

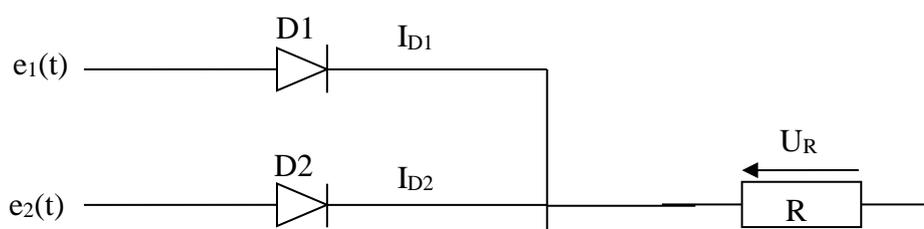
II.4 Redresseur triphasé non-commandés :

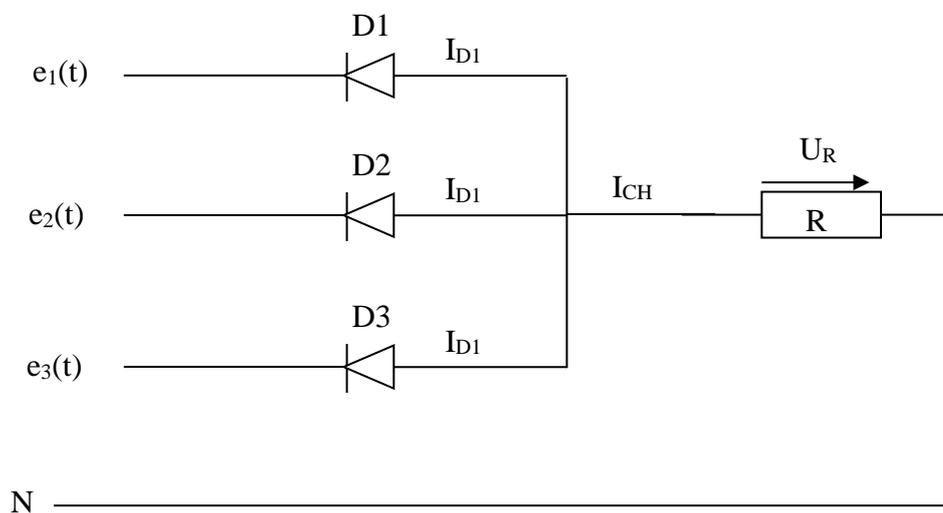
II.4.1 Fonctionnement des redresseurs triphasés simple alternance : montage P3

Nous utilisons l'adjectif "parallèle" (P) pour ce type de montage car entre les deux bornes de sortie, on trouve en parallèle les trois phases formées chacune par une phase et une diode.

Les figures Fig.II.8.a et Fig.II.8.b représente le montage P3, avec le commutateur à trois diodes. Seul le secondaire en étoile du transformateur est représenté. Le neutre "N" est branché au point neutre du secondaire du transformateur.

La figure Fig.II.8.a représente un montage P3 avec la cathode commune, donc la tension de sortie est positive. Alors que la figure Fig.II.8.b représente un montage P3 avec l'anode commune, donc la tension de sortie est négative. Pour tout le reste les deux montages sont identiques.





FigII.8.b Redresseurs triphasés simple alternance : montage P3 à anodes communes

II.4.2. L'évolution des tensions dans un redresseur P3 :

Nous considérant pour ce qui suit, les montages P3 à cathodes communes qui débitent sur des charges résistifs.

Dans ce cas, on aura une seule la diode dont l'anode est au plus haut potentiel qui peut conduire.

Supposons qu'à un instant donné t_1 , $e_1(t)$ devient la tension la plus élevée. Si c'est la diode D_2 conduisait, avant t_1 , donc pour $t \leq t_1$ on a ($V_{D2}=0$, $U_d=U_R=e_2(t)$), Pour la diode D_1 , quand $t \geq t_1$ on a :

$$V_{D1} = V_1 - U_R = V_1 - V_2 > 0$$

Donc, la diode D_1 devient passante.

On a alors :

$$V_{D1} = 0$$

Et

$$V_{D2} = V_2 - V_1 < 0$$

Donc la diode D_2 se bloque. On a donc :

$$U_d = U_R = V_1 \quad \text{quand} \quad V_1 > V_2 \text{ et } V_3$$

$$U_d = U_R = V_2 \quad \text{quand} \quad V_2 > V_1 \text{ et } V_3$$

$$U_d = U_R = V_3 \quad \text{quand} \quad V_3 > V_1 \text{ et } V_2$$

On obtient en définitive le graphe ci-dessous :

Ainsi chaque diode conduit pendant un tiers de la période. On a représenté dans le tableau sous le graphe les intervalles de conduction des diodes (0 : diode bloquée ; 1 : diode passante) ainsi que les expressions des tensions U_d et v_{D1} .

Avec $U_d = U_R$

Soit :

$$V_{D1} = 0 \quad \text{lorsque } D_1 \text{ conduit,}$$

$$V_{D1} = V_1 - V_2 \quad \text{lorsque } D_2 \text{ conduit}$$

$$V_{D1} = V_1 - V_3 \quad \text{lorsque } D_3 \text{ conduit}$$

Voir figure fig.II.9

Avec :

$$V_1 = e_1(t), V_2 = e_2(t) \text{ et } V_3 = e_3(t)$$

$$U_d = U_R$$

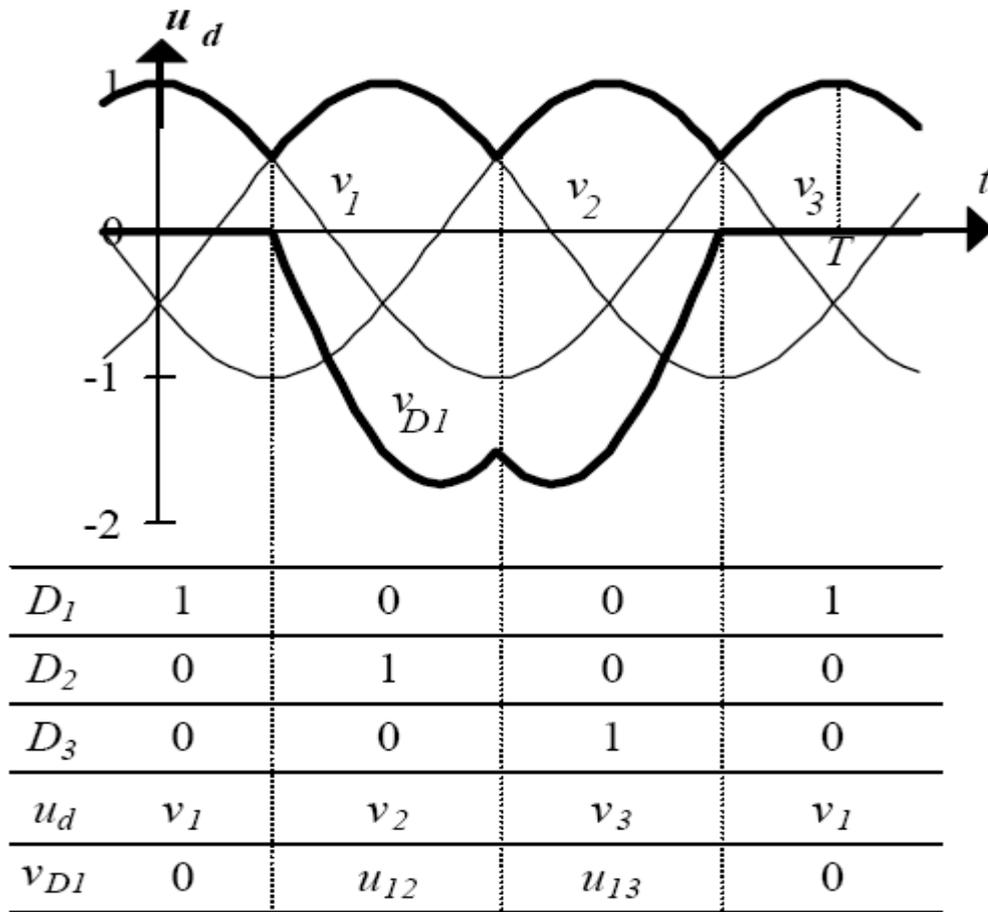


Fig.II.9 Montage P3 : la tension redressée

2.2 Redressement parallèle double ou en pont : montage PD3

La figure ci après représente le redresseur PD3. Seul le secondaire du transformateur est représenté. Ce montage est à comparer au pont de Graëtz en monophasé et à ce titre il peut également être appelé triphasé double alternance.

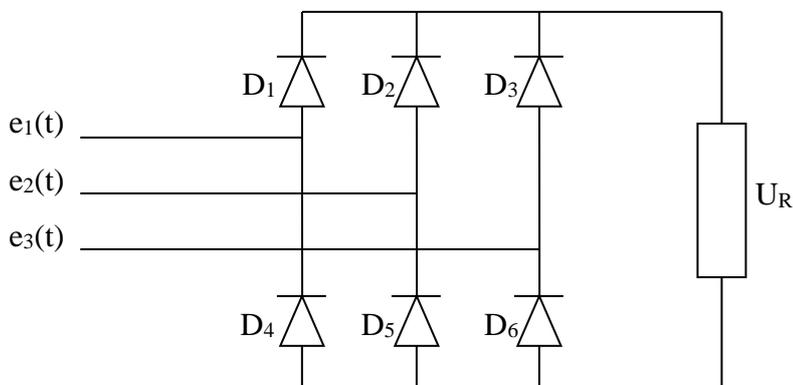


Fig.II.10 Redresseur double alternance. Montage PD3

Le secondaire du transformateur est couplé en étoile et connecté à deux groupes de diodes : un commutateur à cathode commune (D_1, D_2, D_3) et un commutateur à anode commune (D_4, D_5, D_6).

L'existence d'un courant continu dans la charge exige la conduction de deux diodes à tout instant, une de chaque commutateur.

La règle pour déterminer les diodes passantes est la même que pour le montage P3 :

- Pour le commutateur à cathode commune, la diode dont l'anode est au potentiel le plus élevé conduit, d'où la dénomination « + positif » ;
- Pour le commutateur à anode commune, la diode dont la cathode est au potentiel négatif le plus faible conduit, d'où la dénomination « + négatif ».

Donc :

Lorsque : $e_1(t) > e_3(t) > e_2(t)$, D_1 et D_5 conduisent : $U_d = U_R = e_1(t) - e_2(t)$

Lorsque : $e_1(t) > e_2(t) > e_3(t)$, D_1 et D_6 conduisent : $U_d = U_R = e_1(t) - e_3(t)$

Lorsque : $e_2(t) > e_1(t) > e_3(t)$, D_2 et D_6 conduisent : $U_d = U_R = e_2(t) - e_3(t)$

Chaque diode conduit ainsi pendant un tiers de période, tandis que la tension redressée se compose de six portions de sinusoïdes par période T ; ces deux indices avaient des valeurs égales dans le cas des montages parallèles simples.

Sur la figure qui suit, on a représenté l'allure de la tension redressée u_d ainsi que la tension aux bornes de la diode D_1 (v_{D1}).

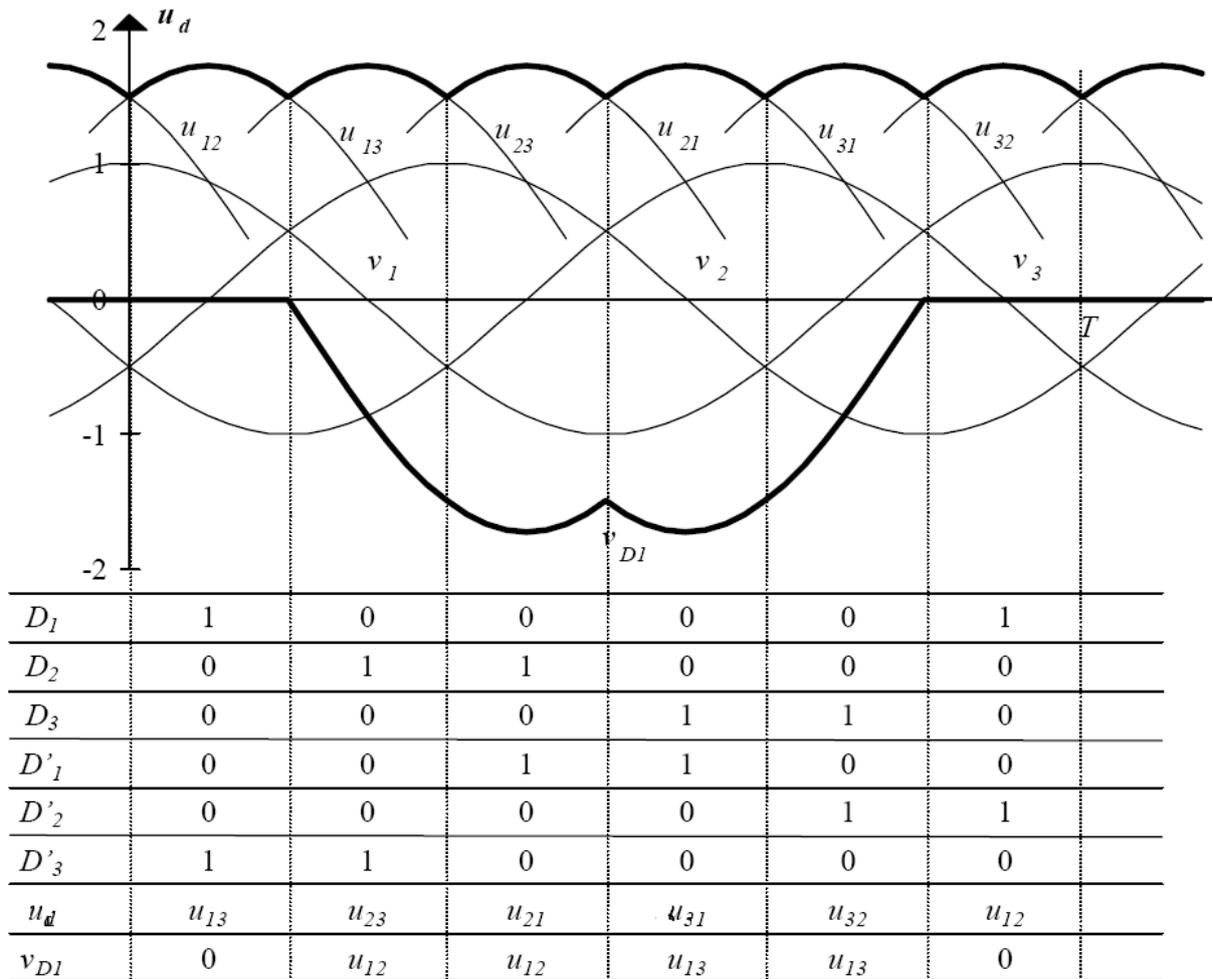


Fig.II.11 Montage PD3 : la tension redressée