

## Introduction au redressement monophasé non commandé

---

«La puissance ne consiste pas à frapper fort ou souvent, mais à frapper juste.»  
Honoré de Balzac in « Physiologie du mariage ».

### Résumé

Les **besoins des récepteurs électriques** nécessitent **d'adapter la forme de l'énergie** fournie par le **réseau de distribution**. C'est le rôle des **modulateurs d'énergie**. Réseaux et récepteurs électriques apparaissent sous deux formes, continus ou alternatifs, conduisent à quatre types de convertisseurs. Parmi ceux-ci, ce document aborde la **conversion alternatif-continu** au sein de **redresseurs** dont l'étude est limitée aux ensembles **non commandés**.

La chaîne de conversion est composée de la **source alternative**, du **commutateur** et de la **charge**. L'étude de chacune de ces fonctions permet de juger de leur influence sur l'efficacité globale du redresseur.

L'étude d'une **structure élémentaire** débitant sur une charge résistive met en place les tension et courant moyens, la puissance moyenne, la puissance apparente et le facteur de puissance. Ce dernier est plutôt médiocre dans cette exemple. L'étude se poursuit donc en **évaluant** vers une **charge inductive**. Dans ces conditions, le courant ne s'annule qu'après la tension, forçant la conduction du commutateur pour laisser apparaître une tension négative aux bornes de la charge. Pour compléter cet aspect, on traite le cas d'une charge comportant une fem en série (comme dans les moteurs à courant continu). Etape suivante de l'amélioration du facteur de puissance, le **commutateur évolue** par **l'insertion d'une diode de roue libre** pour assurer la continuité du courant dans la charge inductive lors d'une conduction continue. Ces considérations permettent de mettre en place une modélisation de la charge par une source de courant. Dernier aspect, la source est modifiée par **l'emploi d'un transformateur** pour assurer un facteur de puissance proche de 1, garant d'une grande qualité du comportement harmonique de l'ensemble {redresseur + charge}.

### Sommaire

---

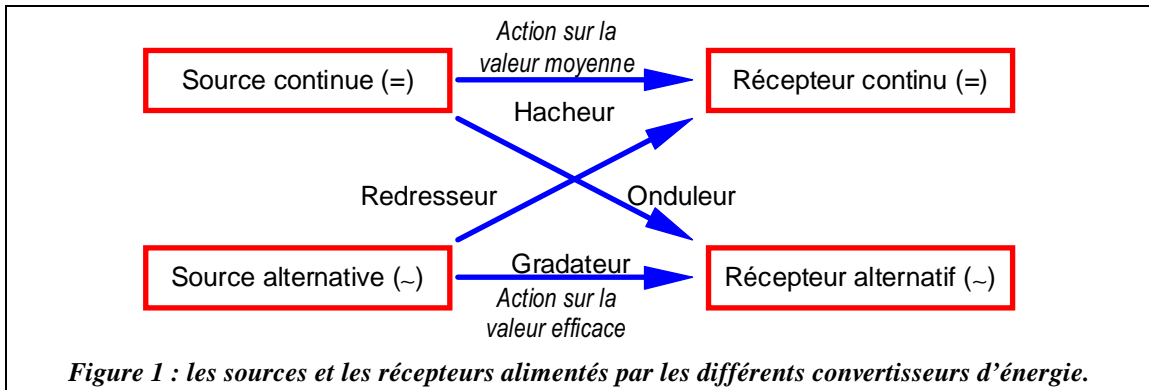
<b>I. Introduction</b> .....	<b>2</b>
I.1. Nécessité de la conversion d'énergie.....	2
I.2. Organisation d'un convertisseur alternatif/continu.....	2
<b>II. Cadre des études — Hypothèses</b> .....	<b>2</b>
<b>III. Introduction au redressement monophasé : cas élémentaire</b> .....	<b>3</b>
III.1. Structure .....	3
III.2. Etude .....	3
III.3. Les éléments d'étude des redresseurs .....	4
<b>IV. Modification de la nature de la charge</b> .....	<b>4</b>
IV.1. Structure .....	4
IV.2. Etude .....	4
<b>V. Adaptation du commutateur</b> .....	<b>5</b>
V.1. Structure .....	5
V.2. Etude .....	6
<b>VI. Amélioration de la source</b> .....	<b>6</b>
VI.1. Structure .....	6
VI.2. Etude .....	7

# I. Introduction

## I.1. Nécessité de la conversion d'énergie

Les différents réseaux électriques industriels alimentent de nombreux actionneurs. Cette énergie apparaît sous deux formes : **alternative** (tensions ou courants sinusoïdaux à *valeur moyenne nulle*) ou **continue**.

Suivant le type d'actionneur, il est nécessaire d'adapter la forme de l'énergie fournie par le réseau. Les différentes possibilités apparaissent à la **Figure 1**.

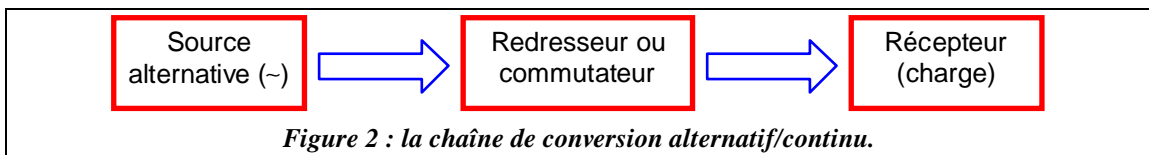


Ce document n'aborde que la conversion d'énergie du type alternatif/continu pour n'étudier que les redresseurs monophasés délivrant une tension moyenne constante dans le cas de différentes charges industrielles.

## I.2. Organisation d'un convertisseur alternatif/continu

L'élément clef de notre étude est le convertisseur. Mais ce redresseur ne peut être dissocié du récepteur qu'il alimente. De la même manière l'ensemble {convertisseur + récepteur} constitue la charge de la source électrique d'où provient l'énergie. L'ensemble constitue une **chaîne de conversion** dont chacun des **éléments** ne peut être **étudié** qu'en **tenant compte des autres**.

Sur la base de ces éléments, on peut considérer que la chaîne de conversion alternative/continue se décompose de la manière représentée à la **Figure 2**.



On tiendra toujours compte d'une source de tension sinusoïdale. Pour adapter les niveaux de tension, un transformateur est placé en tête de la chaîne de conversion. Le récepteur est une charge électrique qui peut comprendre une résistance (ex : chauffage industriel) ou un circuit *RL* voire *RLE* (machine à courant continu). Parfois, la charge est elle-même un convertisseur adaptant l'énergie continue pour alimenter un onduleur par exemple. Le redresseur intermédiaire est chargé de rendre la tension unidirectionnelle tandis que le courant est imposé par la charge.

# II. Cadre des études — Hypothèses

Les semi-conducteurs employés, et en particulier les diodes, sont supposés parfaits : tension de seuil, résistance dynamique en direct et courant inverse nuls.

### III. Introduction au redressement monophasé : cas élémentaire

#### III.1. Structure

On envisage une structure comportant une **source sinusoïdale** et une **diode** pour atteindre une **charge résistive**. On distingue alors les trois blocs précédemment définis : une source, un commutateur et la charge (*Figure 3*).

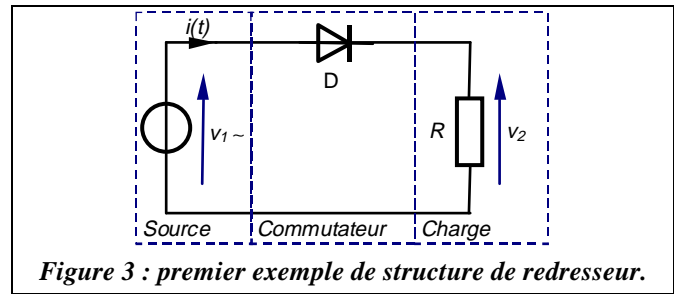


Figure 3 : premier exemple de structure de redresseur.

#### III.2. Etude

L'étude du montage conduit à discuter l'existence du courant  $i(t)$  dans la charge en fonction de l'état de la diode. La tension n'apparaît aux bornes de la charge que si la tension de la source est positive entraînant une tension positive en sortie. Dès que la tension réseau est négative, la diode est bloquée : la tension aux bornes de la charge et le courant sont nuls.

Ce fonctionnement est illustré par les chronogrammes de la *Figure 4*.

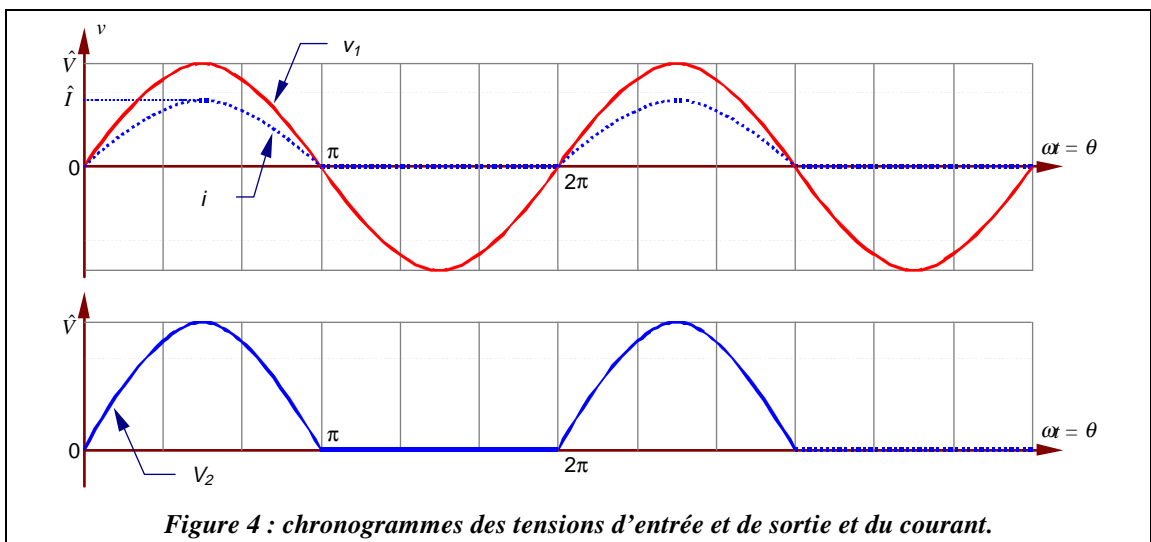


Figure 4 : chronogrammes des tensions d'entrée et de sortie et du courant.

#### Tension et courant moyens

Les valeurs moyennes de la tension aux bornes de la charge et du courant sont :

$$\langle v_2(t) \rangle = V_0 = \frac{V\sqrt{2}}{\pi}$$

$$\langle i(t) \rangle = I_0 = \frac{V\sqrt{2}}{\pi R}$$

#### Puissance

La puissance instantanée est  $p(\theta) = \frac{2V^2}{R} \sin^2 \theta$  de 0 à  $\pi$  puis nulle ensuite.

La puissance moyenne est alors :  $\langle p(\theta) \rangle = P = \frac{V^2}{2R}$

Attention !!  $P \neq V_0 I_0 = \frac{2V^2}{\pi^2 R}$

#### Tension et courant efficaces

Le courant efficace est porté par la puissance moyenne, donc  $I_{eff} = \frac{V}{\sqrt{2R}}$

#### Facteur de puissance

Le facteur de puissance  $k$  est le rapport de la puissance active (moyenne) à la puissance apparente.

Vu de la source :  $P = \langle p(t) \rangle$ ,  $S = V.I_{eff}$  donc  $k = \frac{P}{S} = \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71$

## Conclusion

Ce dispositif rudimentaire assure l'augmentation de la tension moyenne puisqu'elle n'est plus nulle. Il demande à être amélioré afin d'atteindre une valeur proche de la tension crête avec un facteur de puissance bien meilleur que 0,71.

Cet objectif pourra être atteint en adaptant tantôt la source, le commutateur ou la charge ou plusieurs d'entre-eux.

## III.3. Les éléments d'étude des redresseurs

En observant les différents résultats de la partie précédente, de l'étude d'un redresseur, on peut dégager les informations suivantes :

- La tension et le courant moyens du côté de la charge (à partir des formes d'ondes) ;
- la puissance moyenne délivrée à la charge ;
- Les contraintes imposées aux commutateurs (à partir de l'étude des formes d'ondes) ;
- le comportement global en puissance du redresseur (l'efficacité) par l'étude du facteur de puissance.

Mais au-delà de ces considérations et comme cela a été mentionné précédemment, cette conversion d'énergie est influencée par la nature de la charge, du commutateur ou de la source. L'exemple précédent va progressivement être modifié pour mettre en évidence les différentes propriétés.

## IV. Modification de la nature de la charge

### IV.1. Structure

En électrotechnique les charges sont souvent combinées : inductive et résistive. Les électroaimants ou les machines à courant continu en sont des exemples). Le schéma permettant la nouvelle étude est celui de la *Figure 5*.

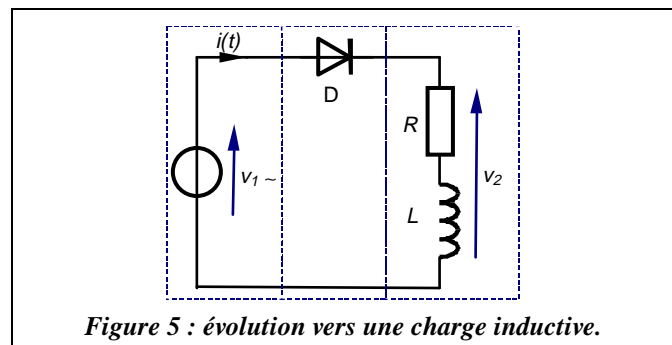


Figure 5 : évolution vers une charge inductive.

### IV.2. Etude

La diode conduit dès que la tension  $v_1$  est positive si bien que la tension  $v_2$  reste identique à  $v_1$ . Pour le courant  $i(t)$ , on assiste à un régime transitoire régit par l'équation différentielle suivante :

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = v_2(t) = V\sqrt{2} \sin \omega t .$$

Pour des raisons de commodité, on effectue le changement de variable  $\theta = \omega t$ , ce qui conduit à :

$$L\omega \frac{di(\theta)}{d\theta} + Ri(\theta) = V\sqrt{2} \sin \theta$$

La résolution (le détail n'est pas présenté) conduit à :

$$i(\theta) = \frac{V\sqrt{2}}{R} \cos \varphi . (\sin \varphi . e^{-\frac{\theta}{\tan \varphi}} + \sin(\theta - \varphi)) \text{ avec } \tan \varphi = \frac{L\omega}{R}$$

On remarque la superposition du régime transitoire (terme exponentiel) et du régime permanent faisant apparaître le déphasage  $\varphi$  du courant sur la tension.

Le courant ne s'annule pas pour  $\theta = \pi$ , mais un peu au-delà en  $\theta_0$ . La diode est alors en conduction forcée si bien que la tension  $v_2$  devient négative jusqu'à l'annulation de  $i$ .

Ces déterminations permettent les tracés de la *Figure 6*.

De cette étude, on peut immédiatement envisager le comportement des grandeurs si la charge est complétée par une force contre-électromotrice (celle d'une MCC par exemple) symbolisée par un générateur  $E$  en série avec les autres éléments.

Dans ces conditions la conduction de la diode D n'apparaît qu'une fois que la tension de cathode est supérieure à celle de l'anode, c'est à dire  $v_1(t) \geq E$ . Cette condition correspond aux angles  $\theta_a$  d'allumage et  $\theta_e$  d'extinction. Le courant respecte les mêmes règles d'existence que ci-dessus : croissante à partir de  $\theta_a$  et annulation au-delà de  $\theta_e$  en  $\theta_0$ . C'est entre ces deux angles que la diode est en conduction forcée qui se traduit par l'apparition d'une portion négative de la tension  $v_2$  (Figure 7).

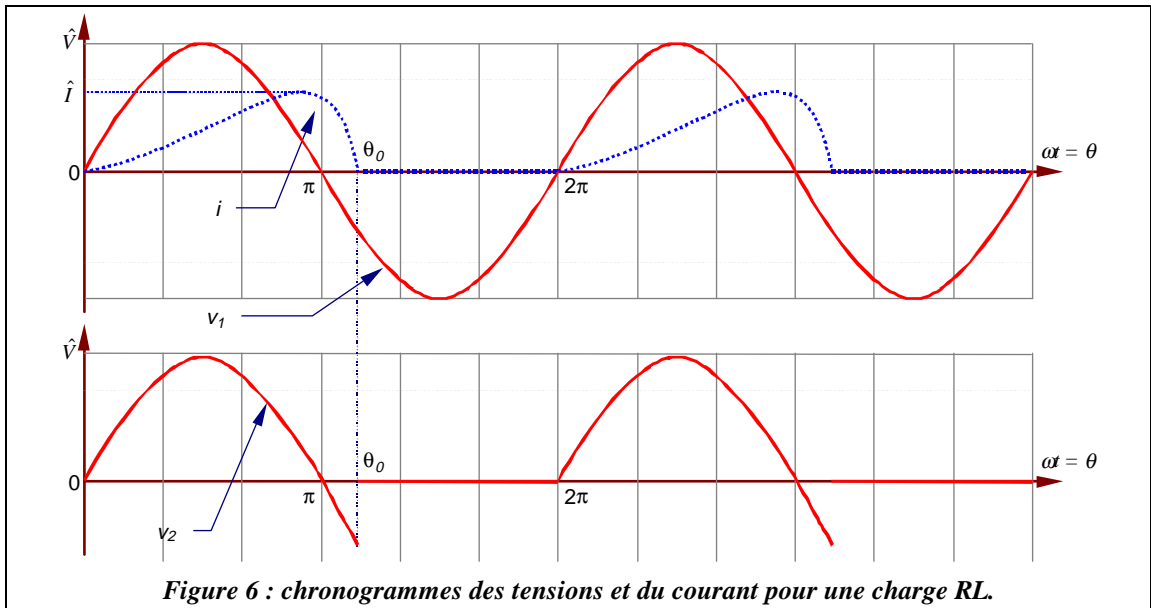


Figure 6 : chronogrammes des tensions et du courant pour une charge RL.

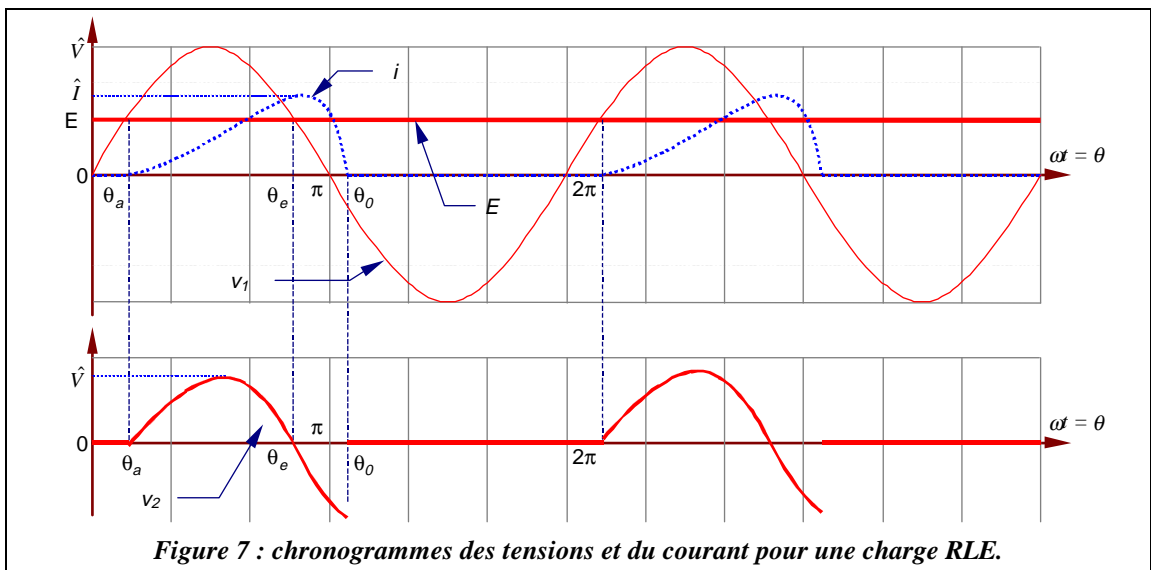


Figure 7 : chronogrammes des tensions et du courant pour une charge RLE.

## V. Adaptation du commutateur

### V.1. Structure

Après la charge, on peut s'interroger sur le moyen de modifier le commutateur de manière à éviter l'influence de la charge sur la tension (toujours dans le cas d'une charge inductive).

La nouvelle structure (Figure 8) assure une phase de roue-libre qui s'inspire de démagnétisation du circuit magnétique d'un transformateur en régime impulsions, d'un enroulement de moteur pas à pas ou les bobines de relais à courant continu.

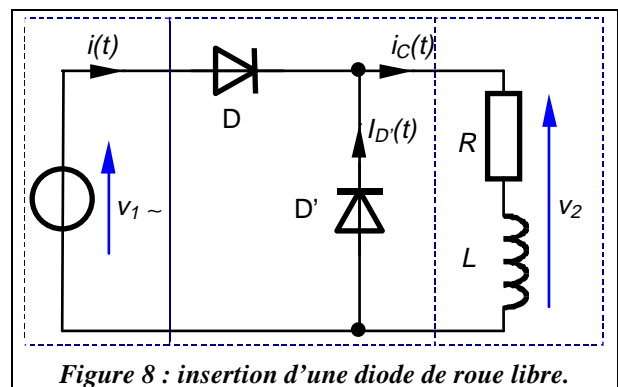
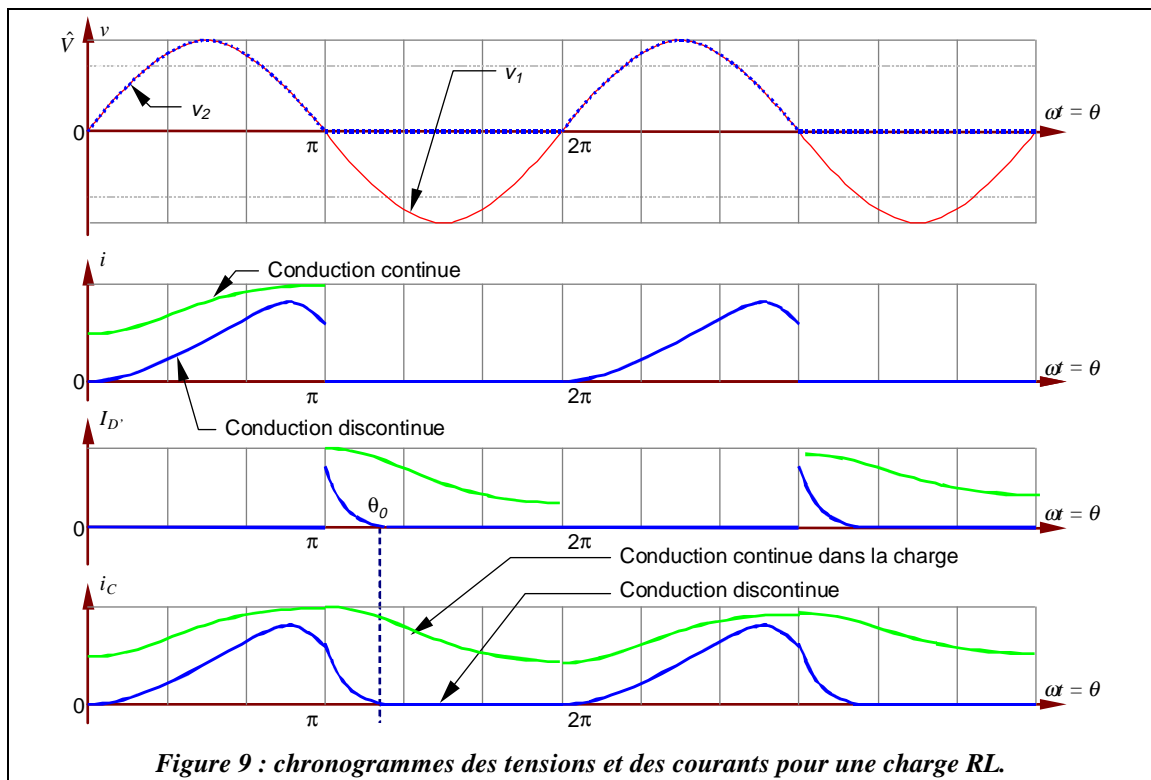


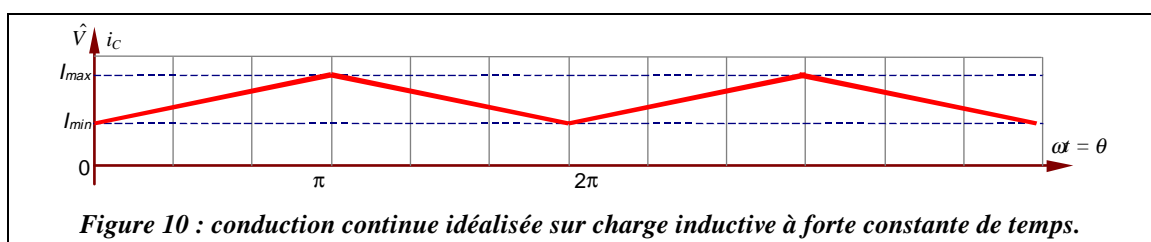
Figure 8 : insertion d'une diode de roue libre.

## V.2. Etude

Durant l'alternance positive de la tension  $v_1$ , la diode  $D$  est passante, si bien que  $D'$  est bloquée. Le comportement du montage est connu (§IV). Dès que  $v_1$  s'annule la diode  $D$  peut se bloquer car la diode  $D'$  prend le relais de la conduction du courant  $i_C$  dans la charge.  $D'$  conduisant, la tension à ses bornes  $v_2$  est nulle. L'énergie emmagasinée dans l'inductance est dissipée dans la résistance  $R$  et le courant  $i_C$  décroît et s'annule en  $\theta_0$ . L'annulation du courant caractérise un fonctionnement en **conduction discontinue**. Si l'énergie est suffisante, le courant ne s'annule pas, c'est la **conduction continue**. Les chronogrammes de la **Figure 6** illustrent ce fonctionnement.



Pour idéaliser l'influence des éléments, la constante de temps  $\tau$  ( $= L/R$ ) de la charge est comparée à la période  $T$  de la tension  $v_1$ . Si  $\tau \gg T$ , le courant  $i_C$  reflète une conduction continue assimilable à des segments de droite comme l'indique la **Figure 10**. Dans un cas extrême, les courants  $I_{min}$  et  $I_{max}$  sont confondus avec le courant moyen  $I_0$ . Le récepteur est équivalent à une source de courant  $I_0$ . Cette dernière forme est utilisée par la suite car elle est souvent recherchée.



## VI. Amélioration de la source

### VI.1. Structure

Dans la poursuite des modifications significatives des éléments de la chaîne de conversion, la dernière étape concerne la source. En multipliant le nombre de phases et en les combinant, on obtient aisément une augmentation de la valeur moyenne de la tension. En monophasé, on ne dispose que d'une seule phase. Une pseudo-phase est créée grâce à un transformateur à deux secondaires (transformateur à point milieu). La source biphasée qui en résulte délivre des tensions opposées.

La nouvelle structure est présentée à **Figure 11**.

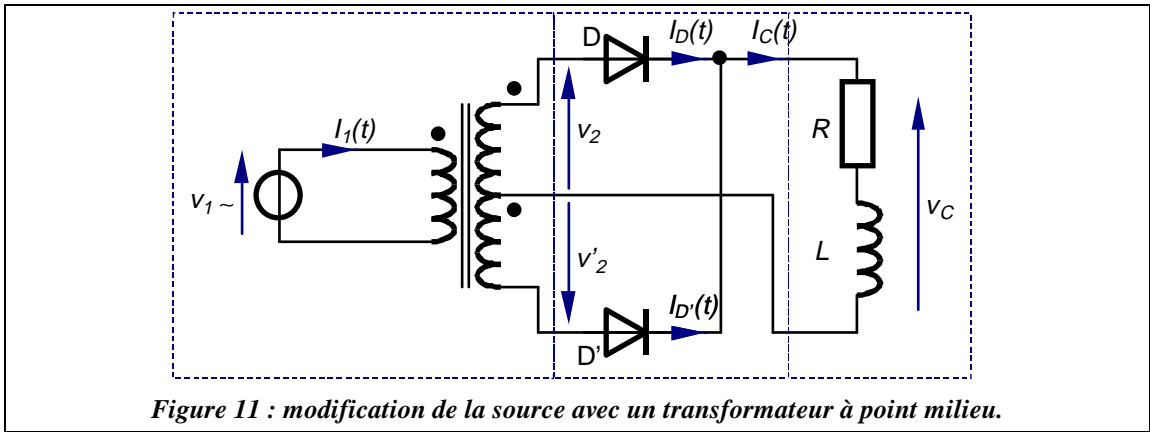


Figure 11 : modification de la source avec un transformateur à point milieu.

## VI.2. Etude

Lorsque  $v_2$  est positive,  $v'_2$  est négative donc D conduit et D' est bloquée, si bien que  $v_C = v_2$ . Par un raisonnement similaire, lorsque  $v'_2$  est positive,  $v_2$  est négative donc D' conduit tandis que D est bloquée. La tension  $v_C$  obtenue à travers ce **redresseur double alternance** est toujours positive (fonction valeur absolue) et ne s'annule que pour  $\pi$  et  $2\pi$  (Figure 12).

L'étude est complétée par la prise en compte des courants (idéalisés) sur cette même figure. Les courants dans les diodes n'existent que lorsqu'elles sont passantes. La détermination des courants primaires (amplitude et signe) passe par l'utilisation des lois relatives au transformateur (théorème d'Ampère en particulier) en considérant le courant de magnétisation nul :

$$N_1 i_1 - N_2 i_D + N_2 i_{D'} = 0$$

Sur la première demi-période  $i_D = I_0$  et  $i_{D'} = 0$  :  $i_1 = m I_0$  ( $m = \frac{N_2}{N_1}$ , rapport de transformation).

Sur la seconde, c'est l'inverse, donc  $i_1 = -m I_0$ .

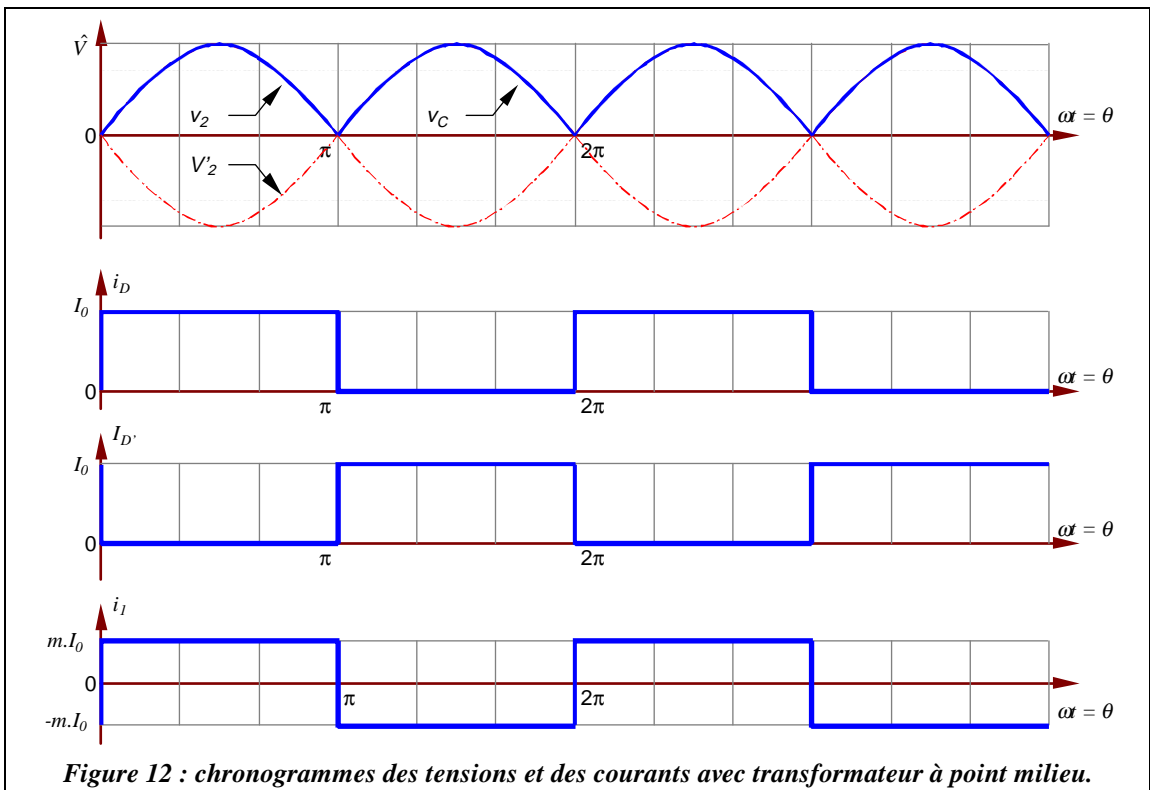


Figure 12 : chronogrammes des tensions et des courants avec transformateur à point milieu.

### Tension moyenne

C'est le double de la valeur moyenne en double alternance :  $V_0 = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi}$

### Courant moyen dans une diode

Chaque diode conduit durant une demi-période, donc :  $I_{D0} = \frac{1}{2} I_0$

### Tension et courant efficaces au secondaire

Les valeurs efficaces des signaux redressés ou non sont les mêmes :  $V_{eff} = V$

Dans chaque enroulement secondaire, le courant n'existe que sur une demi-période :  $I_{eff} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$

### Puissances au secondaire du transformateur

Puissance moyenne :  $p(\theta) = VI_0 \sqrt{2} \sin \theta$  sur chaque demi-période, donc  $P_2 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI_0$

Puissance apparente pour les deux enroulements :  $S_2 = 2V_{eff} I_{eff} = \frac{2VI_0}{\sqrt{2}}$

**Facteur de puissance au secondaire**  $k_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{2}{\pi} \approx 0,64$

### Tension et courant efficaces au primaire

La tension efficace est celle d'une grandeur sinusoïdale :  $V_{eff} = \frac{V}{m}$

Le courant change alternativement de signe, son carré est constant :  $I_{eff} = mI_0$

### Puissances au primaire du transformateur

Puissance moyenne : celle du secondaire  $P_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} VI_0$

Puissance apparente :  $S_1 = V_{eff} I_{eff} = VI_0$

**Facteur de puissance au primaire**  $k_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \approx 0,90$

### Conclusion

La comparaison des facteurs de puissance au secondaire (0,64) et au primaire (0,90) montre une amélioration assez claire dont le transformateur est la cause. En effet, à la différence du paragraphe §III.2, le courant primaire a maintenant une valeur moyenne nulle, ce qui le rend conforme aux exigences d'un réseau alternatif où la composante continue, dite homopolaire doit être nulle.