

II.1 Introduction

Les redresseurs font la conversion alternatif-continu. Alimentés par une tension alternative monophasée ou polyphasée, ils permettent de générer sur la charge un courant continu. On utilise un redresseur chaque fois que l'on a besoin de continu alors que l'énergie électrique est disponible en alternatif. Comme c'est sous cette seconde forme que l'énergie électrique est presque toujours générée et distribuée, les redresseurs ont un très vaste domaine d'applications.

Les redresseurs à diodes, ou redresseurs non contrôlés, ne permettent pas de faire varier le rapport entre la ou les tensions alternatives d'entrée et la tension continue de sortie.

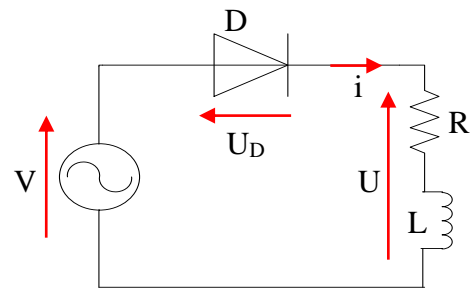
Les redresseurs à thyristors, ou redresseurs contrôlés, permettent, pour une tension alternative d'entrée fixée, de faire varier la tension continue de sortie. Ils sont de plus réversibles; lorsqu'ils assurent le transfert de puissance du côté continu vers le côté alternatif, on dit qu'ils fonctionnent en onduleurs non autonomes. On trouve aussi des redresseurs mixtes ou semi commandés.

II.2 Redressement non commandé

1. Redressement simple alternance, Charge résistive

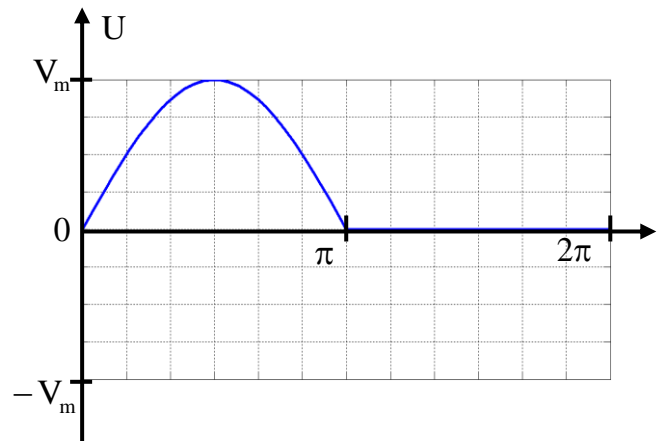
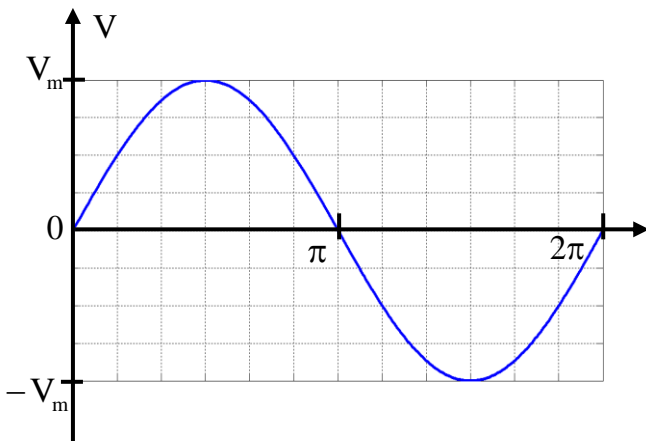
Le montage alimenté par une source de tension alternative sinusoïdale de valeur instantanée

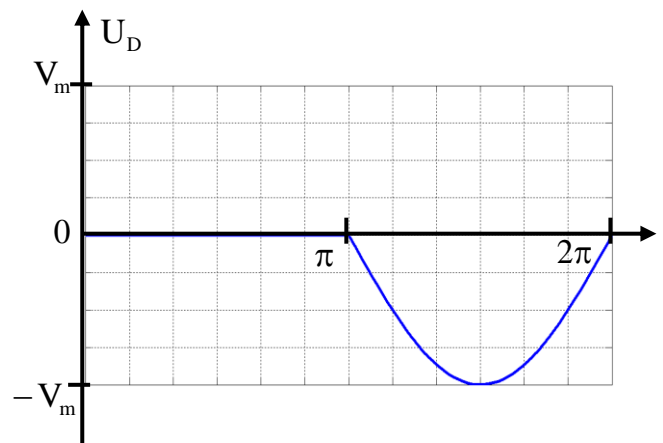
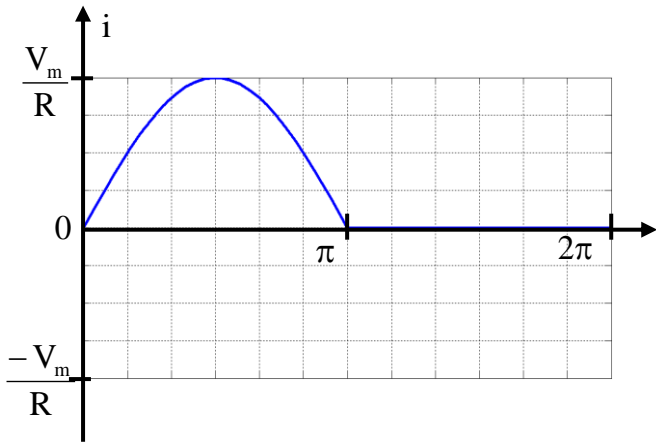
$V = V_m \sin(\omega t)$ ($\omega t = \theta$) débite un courant d'intensité i dans une charge résistive R .



a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$0 \rightarrow \pi$ (Alternance positive)	$\pi \rightarrow 2\pi$ (Alternance négative)
Diode	D est passante	D est bloquée
Tension redressée	$U=V$	$U=0$
Courant redressé	$i = \frac{U}{R} = \frac{V}{R}$	$i = \frac{U}{R} = 0$
Tension aux bornes de la diode D	$U_D=0$	$U_D=V$





b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_m \sin(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{V_m}{\pi} \text{ avec: } T = 2\pi$$

$$i_{\text{moy}} = \frac{V_m}{\pi R}$$

c) Valeur efficace

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_m^2 \sin^2(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{eff}} = \frac{V_m}{2}$$

$$i_{\text{eff}} = \frac{V_m}{R\sqrt{2}}$$

2. 1. Redressement simple alternance, Charge résistive et inductive

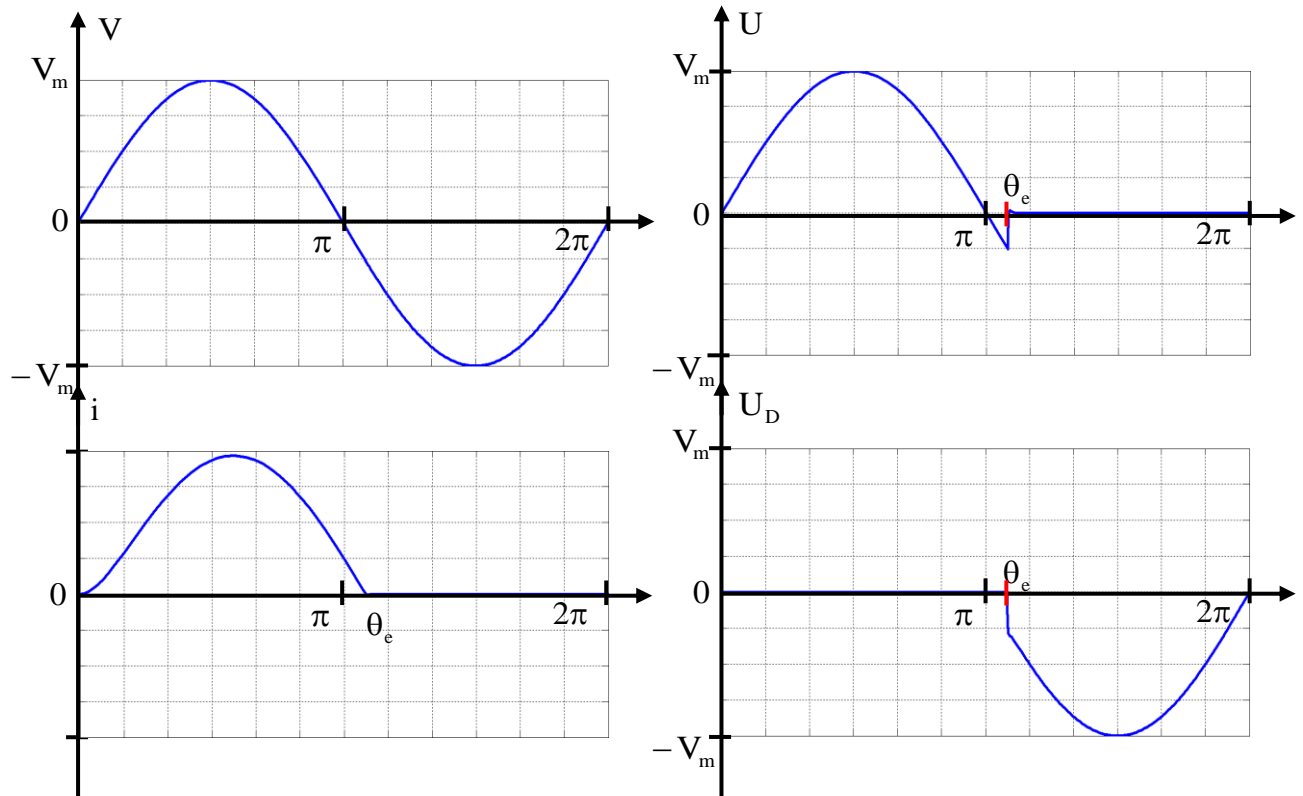
En électrotechnique les charges sont souvent combinées: résistives et inductives. Les électroaimants ou les machines à courant continu en sont des exemples.

a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$0 \rightarrow \pi$	$\pi \rightarrow \theta_e$	$\theta_e \rightarrow 2\pi$
Diode	D est passante	D est passante	D est bloquée
Tension redressée	$U=V$	$U=V$	$U=0$
Courant redressé	$V = Ri + \frac{Ldi}{dt} = V_m \sin(\omega t) \rightarrow$ $i = Ae^{-\frac{R}{L}t} + I_m \sin(\omega t - \varphi)$		$i = 0$
Tension aux bornes de la diode D	$U_D=0$	$U_D=0$	$U_D=V$

Avec: $I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (L\omega)^2}}$, $\tan(\varphi) = \frac{L\omega}{R}$,

Les constantes sont déterminées à partir des conditions initiales.



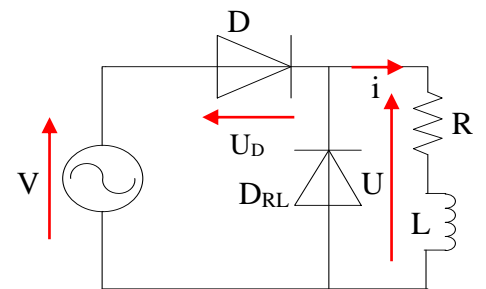
b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\theta_e} V_m \sin(\omega t) dt \rightarrow$$

$$U_{\text{moy}} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos(\pi - \theta_e))$$

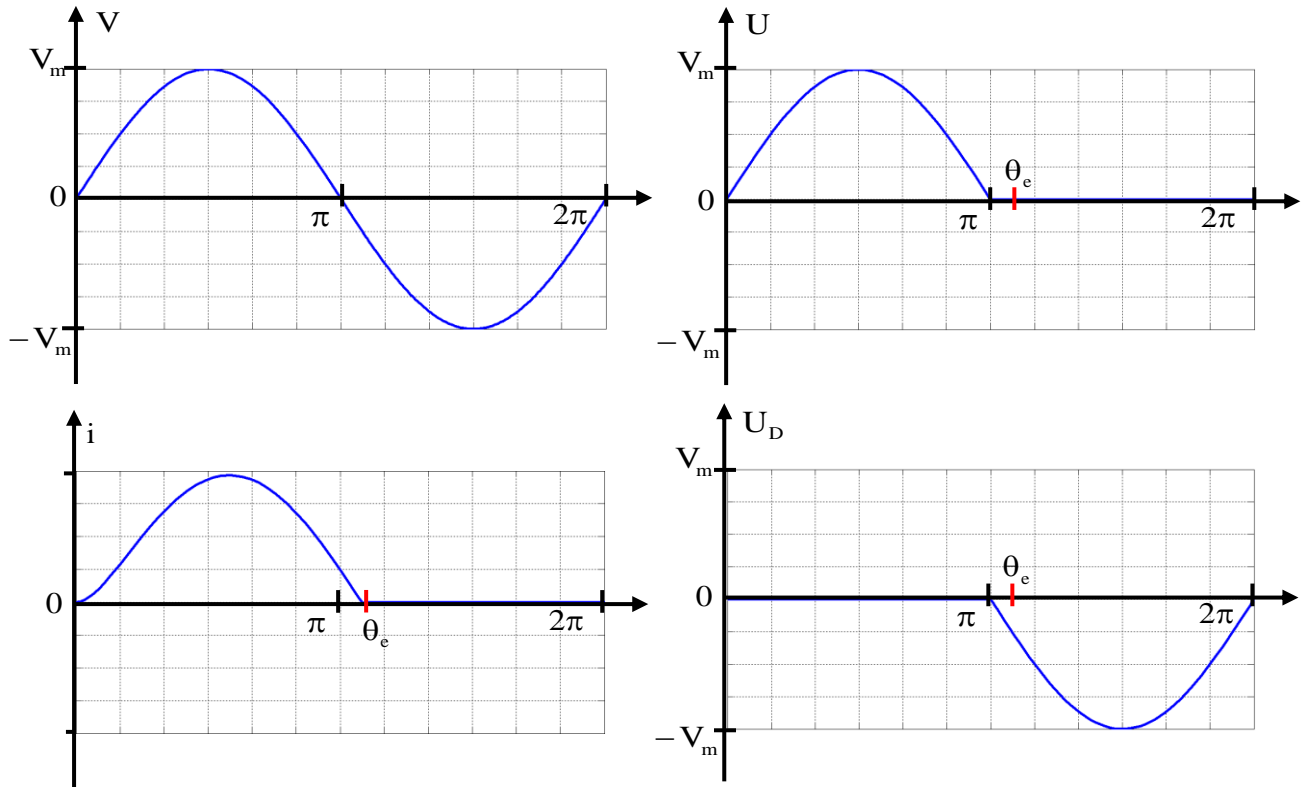
3. Charge résistive, inductive et diode roue libre

Lorsque la charge est de type inductif, la tension à ses bornes peut être négative. Pour corriger ce problème, on ajoute une diode de roue libre. Les deux diodes sont en cathode commune.



a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$0 \rightarrow \pi$	$\pi \rightarrow \theta_e$	$\theta_e \rightarrow 2\pi$
Diode (D)	D est passante	D est bloquée	D est bloquée
Diode (D _{RL})	D _{RL} est bloquée	D _{RL} est passante	D _{RL} est passante
Tension redressée	$U=V$	$U=0$	$U=0$
Courant redressé	$V = Ri + \frac{Ldi}{dt} = V_m \sin(\omega t) \rightarrow$ $i = Ae^{\frac{R}{L}t} + I_m \sin(\omega t - \varphi)$		$i = 0$
Tension aux bornes de la diode D	$U_D=0$	$U_D=V$	$U_D=V$



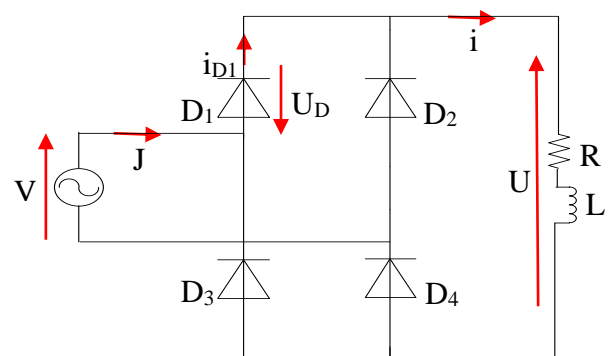
b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_m \sin(\omega t) dt$$

$$\rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{V_m}{\pi}$$

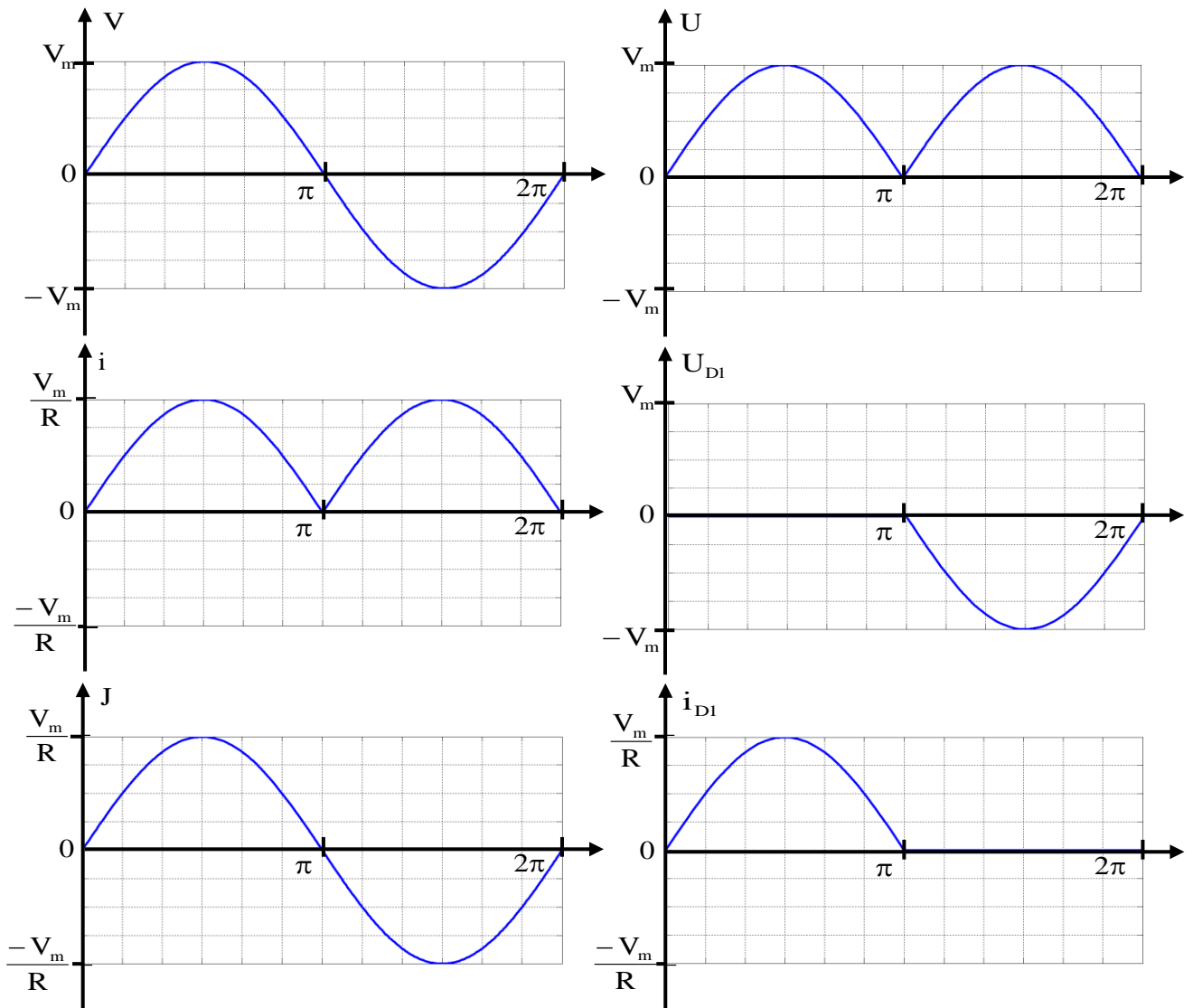
2. Redressement double alternance (pont de Graëtz monophasé PD2)

1. Charge résistive



a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$0 \rightarrow \pi$ (Alternance positive)	$\pi \rightarrow 2\pi$ (Alternance négative)
Diodes	D ₁ et D ₄ sont passantes	D ₂ et D ₃ sont passantes
Tension redressée	$U = V$	$U = -V$
Courant redressé	$i = J = \frac{U}{R} = \frac{V}{R}$	$i = -J = \frac{U}{R} = -\frac{V}{R}$
Courant traversant la diode D ₁	$i_{D1} = i = J$	$i_{D1} = 0$
Tension aux bornes de la diode D ₁	$U_{D1} = 0$	$U_{D1} = V$



b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_m \sin(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$i_{\text{moy}} = \frac{2V_m}{\pi R}$$

c) Valeur efficace

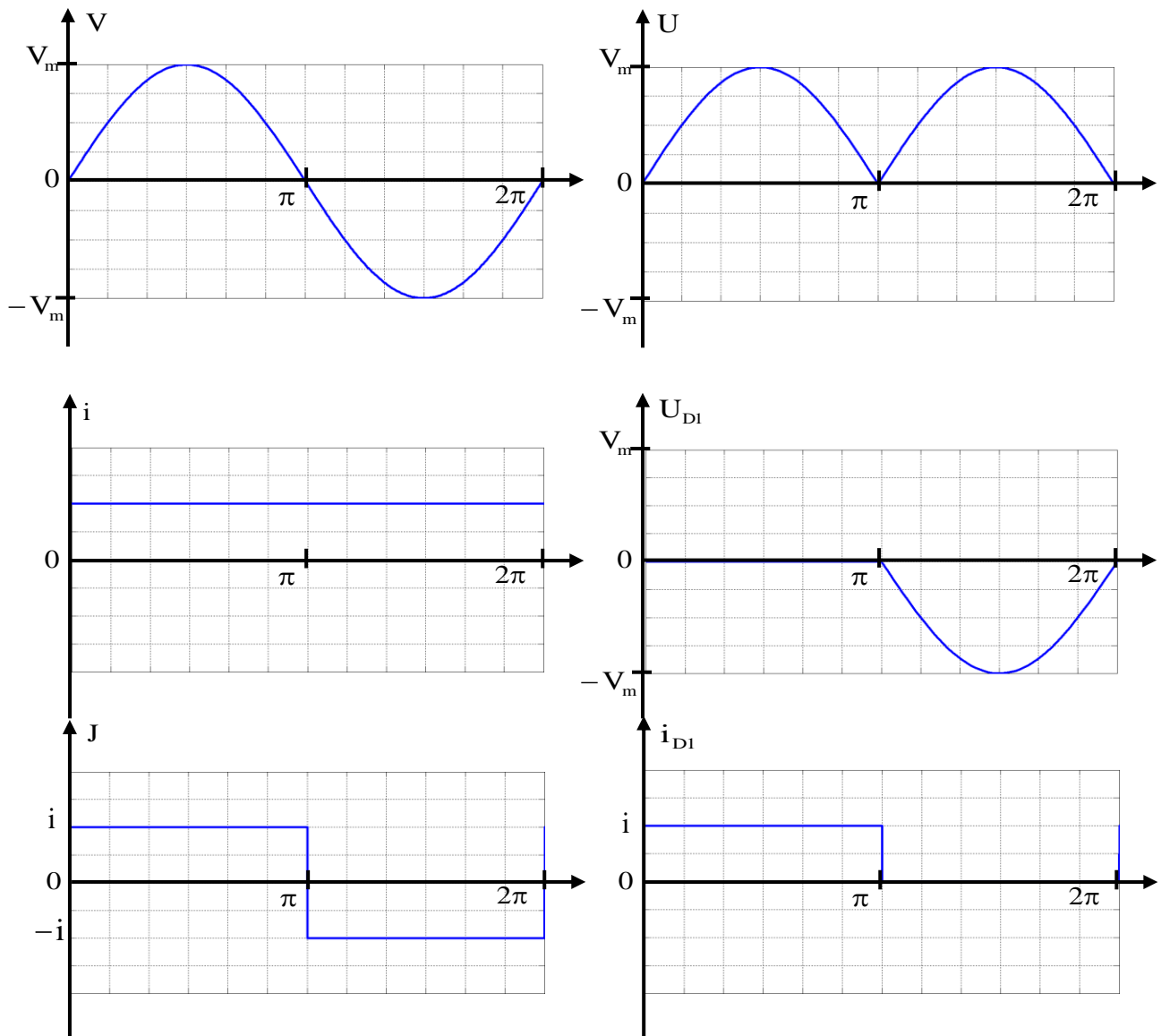
$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}}^2 = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} V_m^2 \sin^2(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{eff}} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$i_{\text{eff}} = \frac{V_m}{R\sqrt{2}}$$

2. Charge résistive et inductive (lissage du courant)

a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$0 \rightarrow \pi$ (Alternance positive)	$\pi \rightarrow 2\pi$ (Alternance négative)
Diodes	D_1 et D_4 sont passantes	D_2 et D_3 sont passantes
Tension redressée	$U = V$	$U = -V$
Courant redressé	$i = J$	$i = -J$
	• Le courant i est lissé par la bobine d'inductance L	
Courant traversant la diode D_1	$i_{D1} = i = J$	$i_{D1} = 0$
Tension aux bornes de la diode bloquée D_1	$U_D = 0$	$U_D = V$



II.2.2 Redresseurs triphasés

Pour obtenir une tension continue, on redresse un ensemble de q tensions alternatives, d'ordinaire supposées sinusoïdales et formant un système polyphasé équilibré (q : nombre de

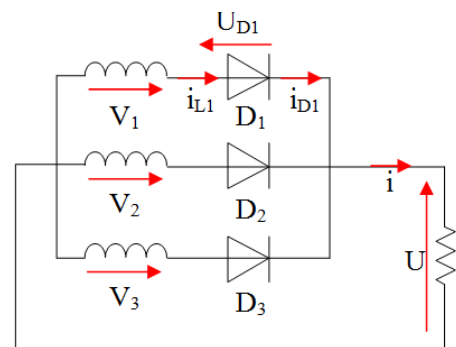
phases). Ces tensions peuvent être les tensions aux bornes d'un alternateur. Généralement, elles sont fournies par le réseau monophasé ou, plus souvent, par le réseau triphasé, d'ordinaire par l'intermédiaire d'un transformateur.

On distingue trois types de montages :

- ✓ **Pq**: montages avec source en étoile et un seul commutateur ou redresseur "simple alternance" ;
- ✓ **PDq**: montages avec source en étoile et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source étoilée ;
- ✓ **Sq**: montages avec source en polygone et deux commutateurs ou redresseurs "en pont" avec source polygonale.

1. Redresseur parallèle simple P3

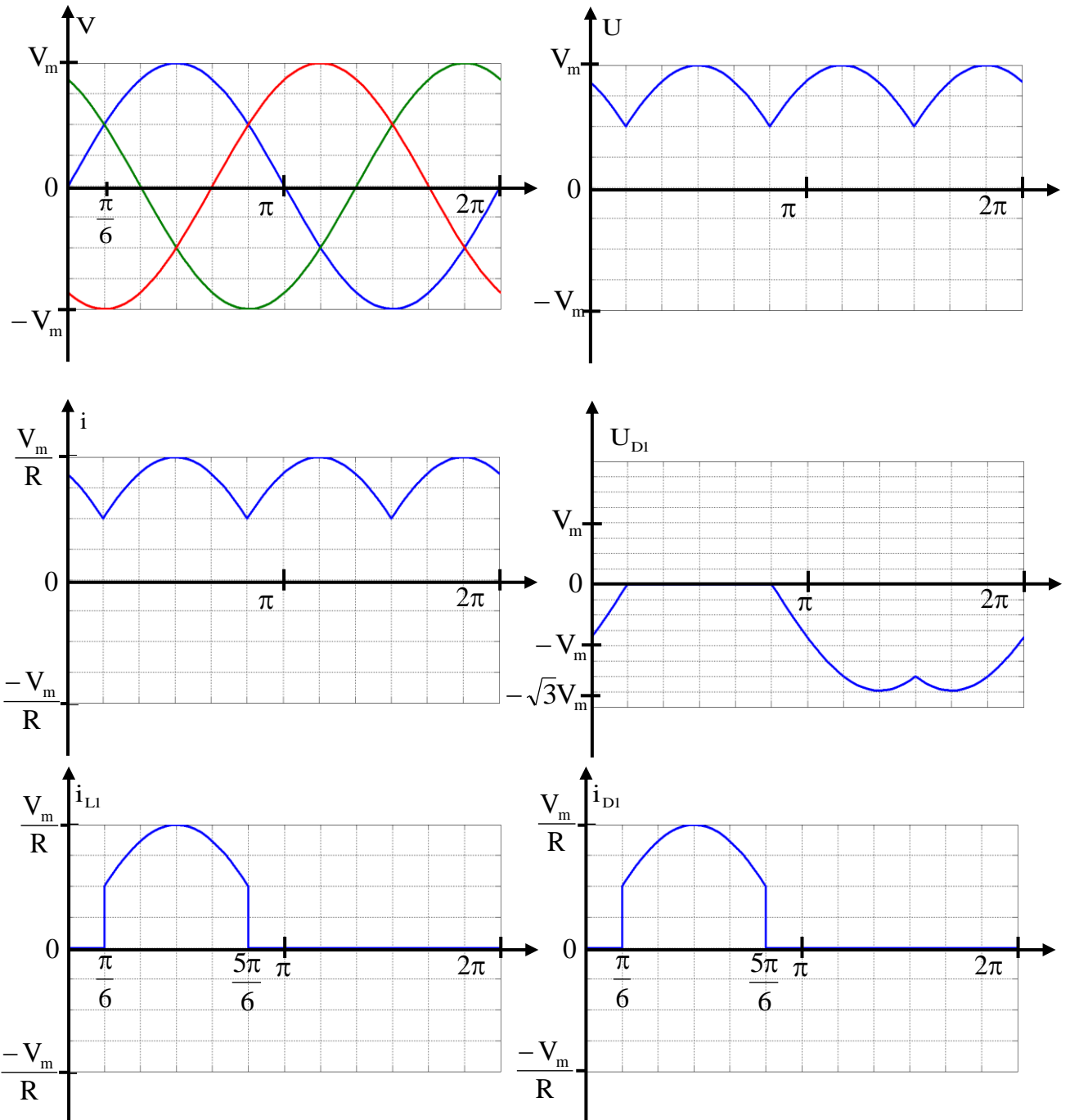
Chaque diode est raccordée sur une phase ($V_1 = V_m \sin(\omega t), V_2 = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$ et $V_3 = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$), les cathodes sont communes et raccordées sur la charge. Le retour au transformateur s'effectue par le neutre. Seule la diode dont l'anode est au plus haut potentiel peut conduire.



1. Charge résistive

a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$\frac{\pi}{6} \rightarrow \frac{5\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{6} \rightarrow \frac{9\pi}{6}$	$\frac{9\pi}{6} \rightarrow \frac{13\pi}{6}$
Diodes passant(D)	D ₁	D ₂	D ₃
Tension redressée	U=V ₁	U=V ₂	U=V ₃
Courant redressé	$i = \frac{U}{R} = \frac{V_1}{R}$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V_2}{R}$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V_3}{R}$
Tension aux bornes de la diode D ₁	U _{D1} =0	U _{D1} = V ₁ -V ₂	U _{D1} = V ₁ -V ₃
Courant traversant la diode D ₁	$i_{D1} = \frac{U}{R} = \frac{V_1}{R}$	i _{D1} = 0	i _{D1} = 0
Courant de la ligne 1 (enroulements secondaires)	$i_{L1} = i_{D1} = \frac{U}{R} = \frac{V_1}{R}$	i _{L1} = i _{D1} = 0	i _{L1} = i _{D1} = 0



b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{3}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} V_1(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{3}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} V_m \sin(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} = 0.83V_m$$

$$i_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi R}$$

c) Valeur efficace

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}}^2 = \frac{3}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} (V_1(t))^2 dt \rightarrow U_{\text{eff}}^2 = \frac{3}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} V_m^2 \sin^2(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{eff}} = 0.84V_m$$

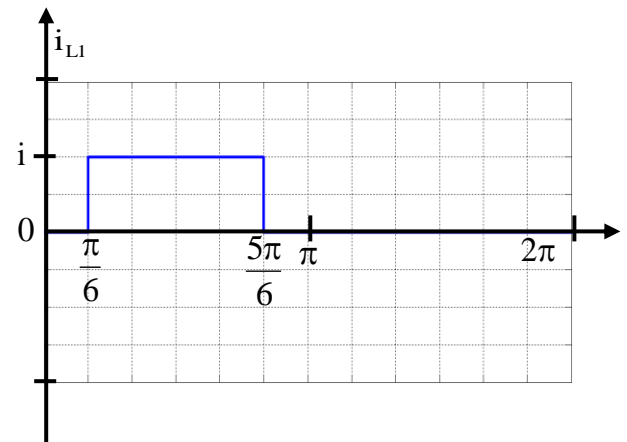
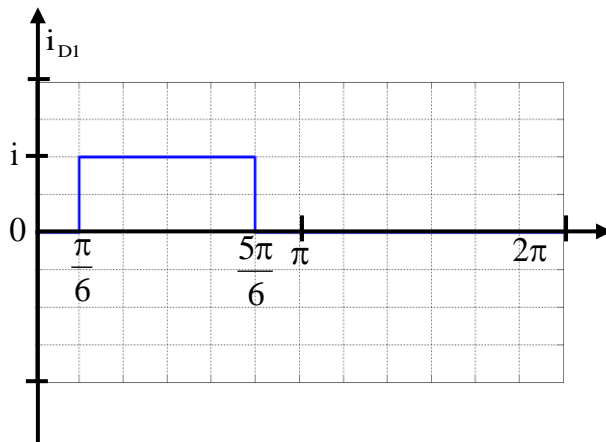
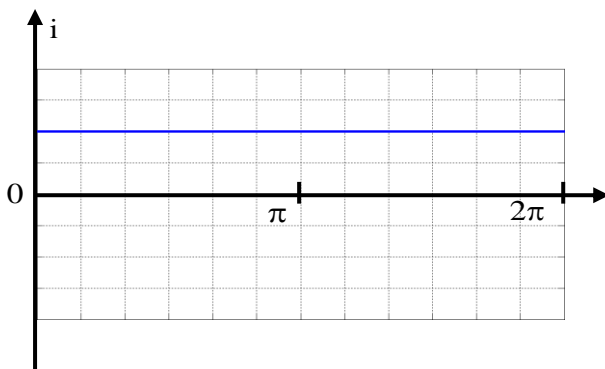
$$i_{\text{eff}} = \frac{0.84V_m}{R}$$

d) Facteur de forme

$$F = \frac{U_{\text{eff}}}{U_{\text{moy}}} = 1.02$$

II.2.2.2.2 Charge résistive et inductive (lissage du courant)

Le courant i est lissé par la bobine d'inductance L . Son intensité est imposée par la charge R .



Courant dans une diode

a) Valeur moyenne

$$i_{D\text{moy}} = i_{D1\text{moy}} = i_{D2\text{moy}} = i_{D3\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} i(t) dt = \frac{i}{3}$$

b) Valeur efficace

$$i_{D\text{eff}} = i_{D1\text{eff}} = i_{D2\text{eff}} = i_{D3\text{eff}} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} i^2(t) dt = \frac{i}{\sqrt{3}}$$

Courant dans les enroulements secondaires du transformateur

a) Valeur moyenne

$$i_{L\text{moy}} = i_{L1\text{moy}} = i_{L2\text{moy}} = i_{L3\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} i(t) dt = \frac{i}{3}$$

b) Valeur efficace

$$i_{L\text{moy}} = i_{L1\text{moy}} = i_{L2\text{moy}} = i_{L3\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} i^2(t) dt = \frac{i}{\sqrt{3}}$$

II.2.2.3 Redresseur parallèle double PD3

Ce redresseur est le prototype du redresseur industriel. Il peut être vu comme une combinaison de 2 redresseurs P3.

Les trois diodes D_1, D_2, D_3 forment un commutateur plus positif, qui laisse passer à tout instant la plus positive des tensions, et les diodes D_1', D_2', D_3' forment un commutateur plus négatif, qui laisse passer la plus négative des tensions.

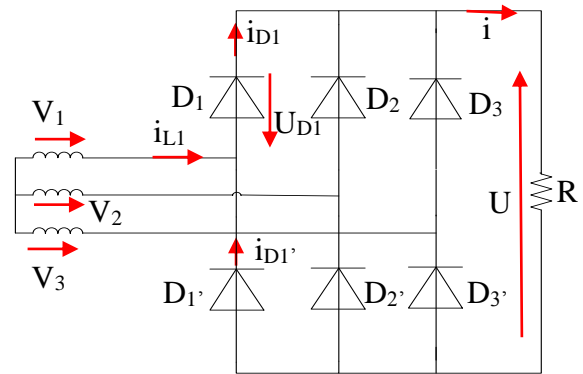


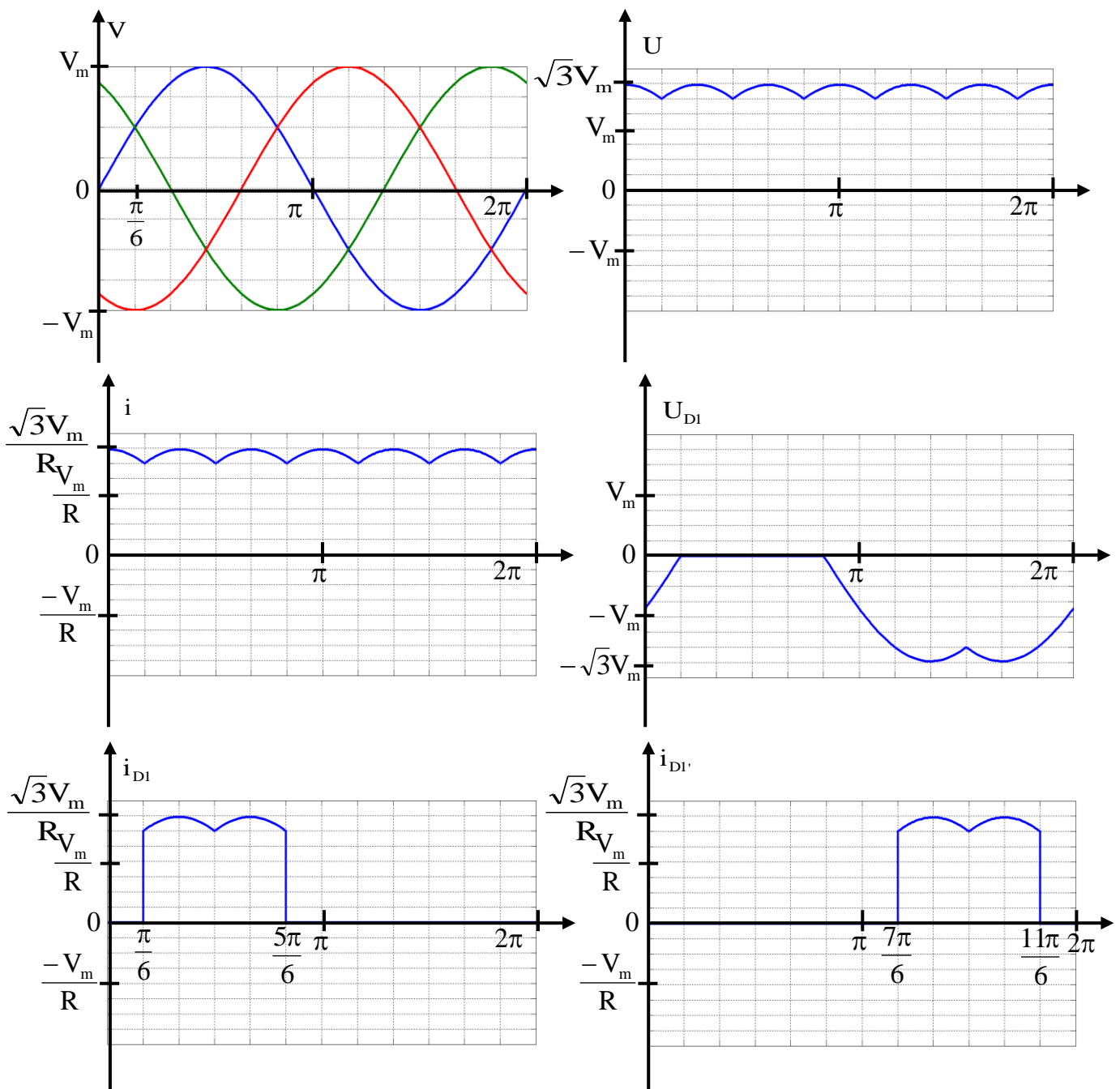
Schéma du redresseur PD3

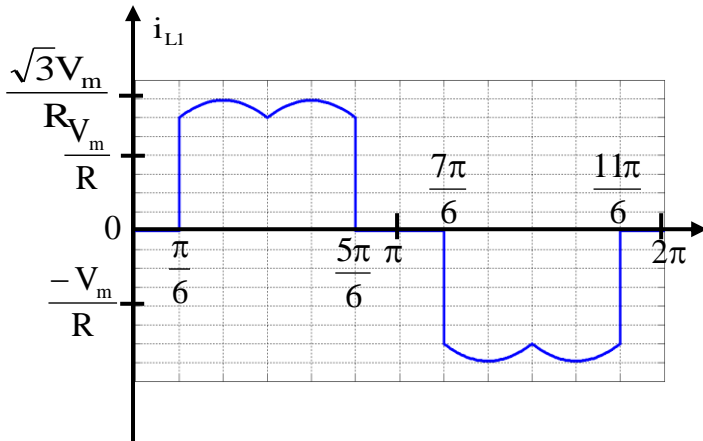
1. Charge R

a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$\frac{\pi}{6} \rightarrow \frac{3\pi}{6}$	$\frac{3\pi}{6} \rightarrow \frac{5\pi}{6}$	$\frac{5\pi}{6} \rightarrow \frac{7\pi}{6}$
Diodes passantes	D_1 et D_2'	D_1 et D_3'	D_2 et D_3'
Tension redressée	$U = V_1 - V_2$	$U = V_1 - V_3$	$U = V_2 - V_3$
Courant redressé	$i = \frac{U}{R} = \frac{V_1 - V_2}{R}$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V_1 - V_3}{R}$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V_2 - V_3}{R}$
Tension aux bornes de la diode D_1	$U_{D1} = 0$	$U_{D1} = 0$	$U_{D1} = V_1 - V_2$
Courant traversant la diode D_1	$i_{D1} = \frac{U}{R} = \frac{V_1 - V_2}{R}$	$i_{D1} = \frac{U}{R} = \frac{V_1 - V_2}{R}$	$i_{D1} = 0$
Courant traversant la diode D_1'	$i_{D1'} = 0$	$i_{D1'} = 0$	$i_{D1'} = 0$
Courant de la ligne 1 (enroulements secondaires)	$i_{L1} = i_{D1}$	$i_{L1} = i_{D1}$	$i_{L1} = 0$

Intervalles	$\frac{7\pi}{6} \rightarrow \frac{9\pi}{6}$	$\frac{9\pi}{6} \rightarrow \frac{11\pi}{6}$	$\frac{11\pi}{6} \rightarrow \frac{13\pi}{6}$
Diodes passantes	D ₂ et D ₁ '	D ₃ et D ₁ '	D ₃ et D ₂ '
Tension redressée	$U=V_2-V_1$	$U=V_3-V_1$	$U=V_3-V_2$
Courant redressé	$i = \frac{U}{R} = \frac{V_2 - V_1}{R}$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V_3 - V_1}{R}$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V_3 - V_2}{R}$
Tension aux bornes de la diode D ₁	$U_{D1} = V_1 - V_2$	$U_{D1} = V_1 - V_3$	$U_{D1} = V_1 - V_3$
Courant traversant la diode D ₁	$i_{D1} = 0$	$i_{D1} = 0$	$i_{D1} = 0$
Courant traversant la diode D ₁ '	$i_{D1'} = \frac{U}{R} = \frac{V_2 - V_1}{R}$	$i_{D1'} = \frac{U}{R} = \frac{V_2 - V_1}{R}$	$i_{D1'} = 0$
Courant de la ligne 1 (enroulements secondaires)	$i_{L1} = -i_{D1'}$	$i_{L1} = -i_{D1'}$	$i_{L1} = 0$





$$i_{L1} = i_{D1} - i_{D1'}$$

$$i_{L2} = i_{D2} - i_{D2'}$$

$$i_{L3} = i_{D3} - i_{D3'}$$

b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{6}{T} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} V_1 - V_2(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{6}{T} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} (V_m \sin(\omega t) - V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})) dt \rightarrow$$

$$U_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} = 1.66V_m$$

$$i_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi R}$$

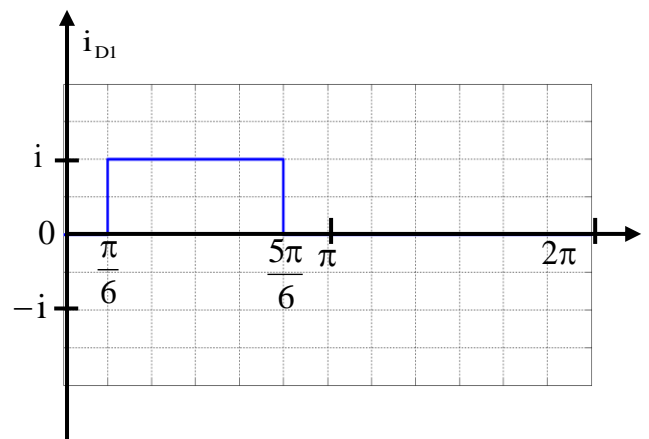
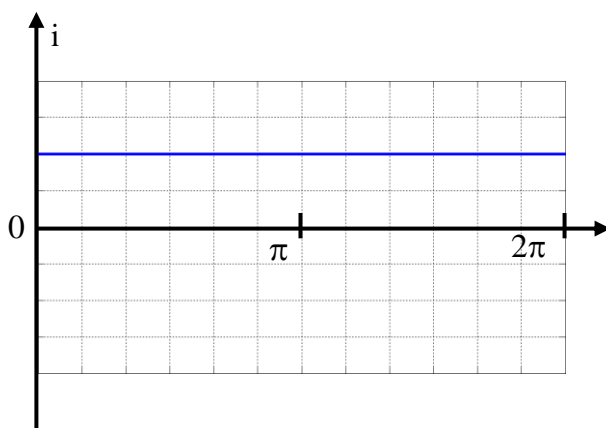
c) Valeur efficace

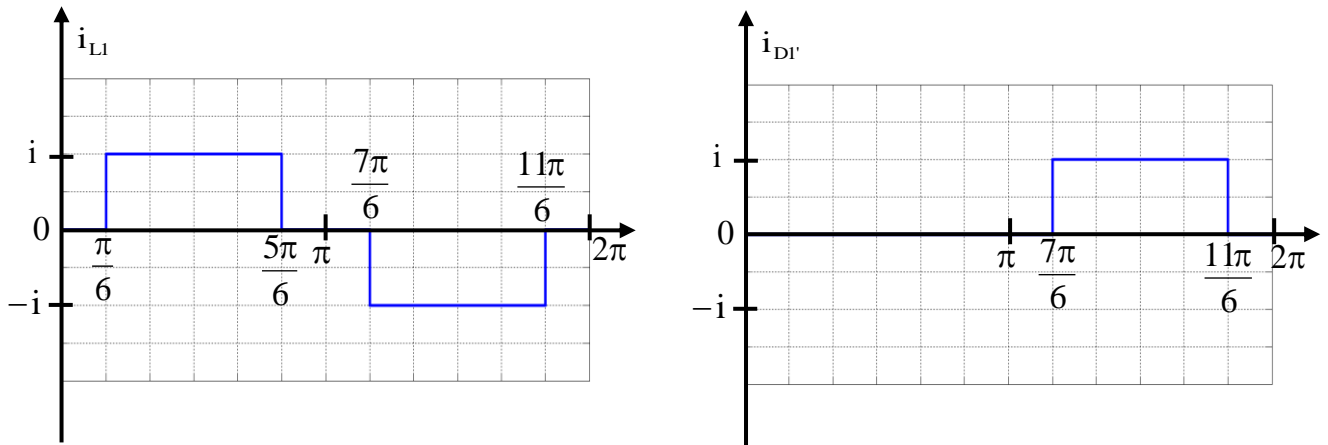
$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}}^2 = \frac{6}{T} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} (V_m^2 \sin^2(\omega t) - V_m^2 \sin^2(\omega t - \frac{2\pi}{3})) dt \rightarrow U_{\text{eff}} = 1.662V_m$$

$$i_{\text{eff}} = \frac{1.662V_m}{R}$$

d) Facteur de forme $F = \frac{U_{\text{eff}}}{U_{\text{moy}}} = 1.0009$

2. Charge R, L (lissage du courant)





Courant dans une diode

a) Valeur moyenne

$$i_{D_{moy}} = i_{D1_{moy}} = i_{D2_{moy}} = i_{D3_{moy}} = i_{D1'_{moy}} = i_{D2'_{moy}} = i_{D3'_{moy}} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} i(t) dt = \frac{i}{3}$$

b) Valeur efficace

$$i_{D_{eff}} = i_{D1_{eff}} = i_{D2_{eff}} = i_{D3_{eff}} = i_{D1'_{eff}} = i_{D2'_{eff}} = i_{D3'_{eff}} = \frac{1}{T} \int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} i^2(t) dt = \frac{i}{\sqrt{3}}$$

Courant dans les enroulements secondaires du transformateur

a) Valeur moyenne

$$i_{L1_{moy}} = \frac{1}{T} \left[\int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} i(t) dt - \int_{\frac{7T}{12}}^{\frac{11T}{12}} i(t) dt \right] = i_{D1_{moy}} - i_{D1'_{moy}} = 0$$

b) Valeur efficace

$$i_{L1_{moy}} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_{\frac{T}{12}}^{\frac{5T}{12}} i^2(t) dt - \int_{\frac{7T}{12}}^{\frac{11T}{12}} i^2(t) dt \right]} = i \sqrt{\frac{2}{3}}$$

II.2.2.4 Redresseur du type série S3

Le montage redresseur S3 à diodes est constitué de six diodes. Les enroulements secondaires du transformateur sont couplés en triangle.

D₁, D₂ et D₃ conduisent dès que V₁, V₂, V₃ devient positives, D₁' , D₂' et D₃' conduisent dès que V₁, V₂, V₃ devient négatives.

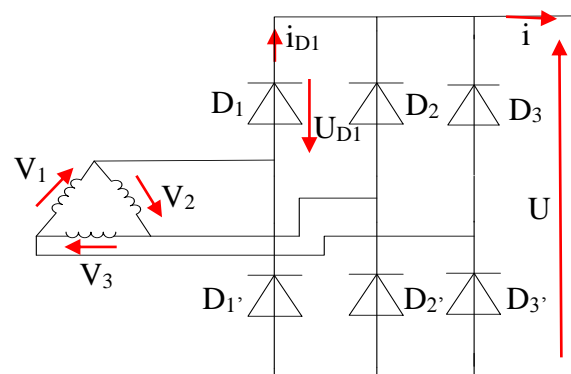
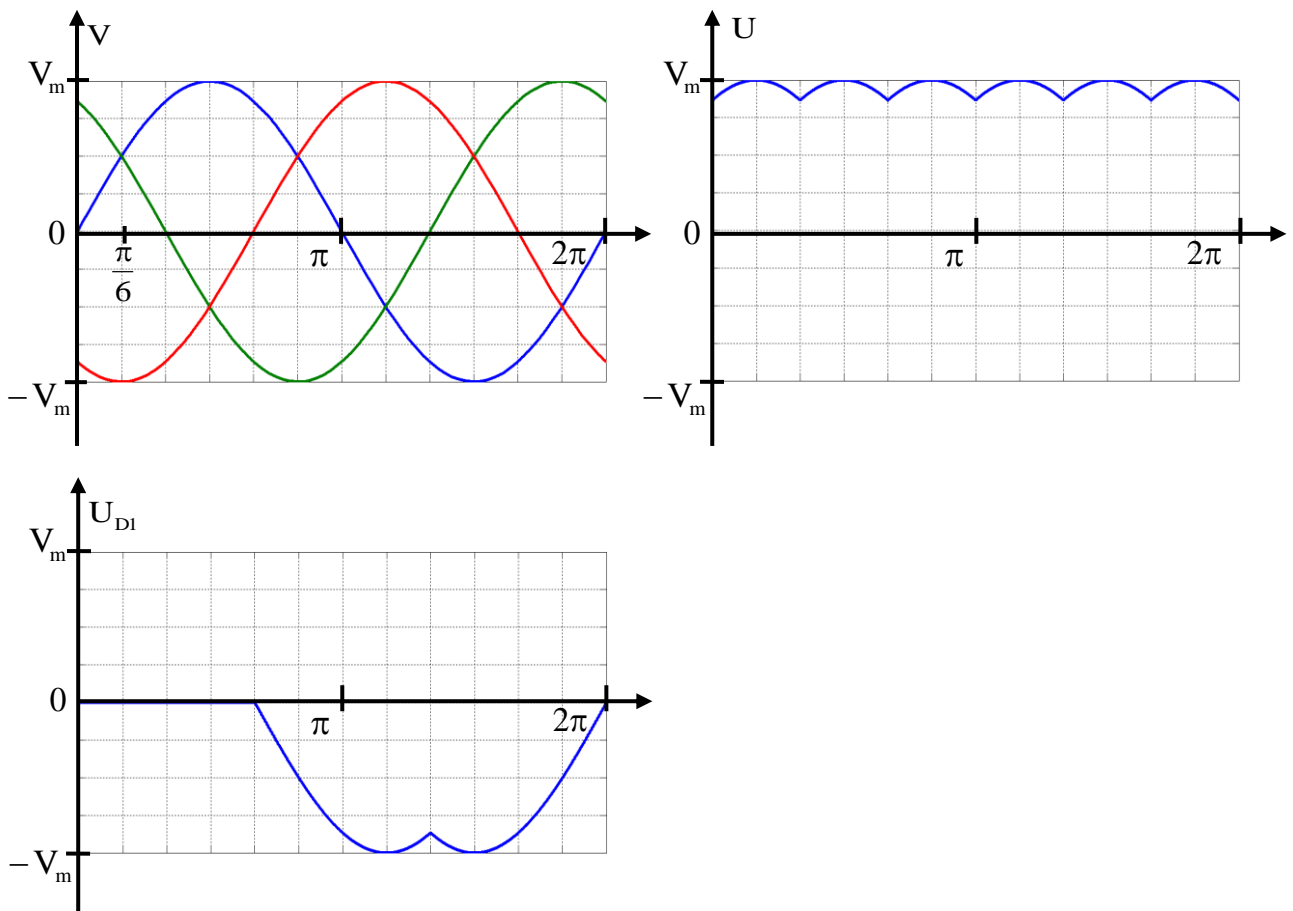


Figure 2.9: Schéma du redresseur S3

a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$0 \rightarrow \frac{2\pi}{6}$	$\frac{2\pi}{6} \rightarrow \frac{4\pi}{6}$	$\frac{4\pi}{6} \rightarrow \frac{6\pi}{6}$
Diode passante (D)	D ₁ et D ₂ '	D ₁ et D ₃ '	D ₂ et D ₃ '
Tension redressée	$U = -V_2$	$U = V_1$	$U = -V_3$
Tension aux bornes de la diode D ₁	$U_{D1} = 0$	$U_{D1} = 0$	$U_{D1} = -V_2$

Intervalles	$\frac{6\pi}{6} \rightarrow \frac{8\pi}{6}$	$\frac{8\pi}{6} \rightarrow \frac{10\pi}{6}$	$\frac{10\pi}{6} \rightarrow \frac{12\pi}{6}$
Diode passante (D)	D ₂ et D ₁ '	D ₃ et D ₁ '	D ₃ et D ₂ '
Tension redressée	$U = V_2$	$U = -V_1$	$U = V_3$
Tension aux bornes de la diode D ₁	$U_{D1} = -V_2$	$U_{D1} = V_1$	$U_{D1} = V_1$



b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{6}{T} \int_0^{\frac{T}{6}} V_1(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{6}{T} \int_0^{\frac{T}{6}} V_m \sin(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{3V_m}{\pi} = 0.95V_m$$

$$i_{\text{moy}} = \frac{3V_m}{\pi R}$$

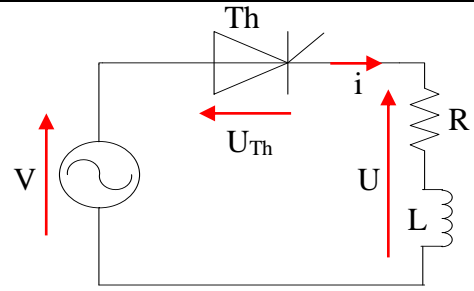
II.3 Redressement commandé

On remplace les diodes par des thyristors.

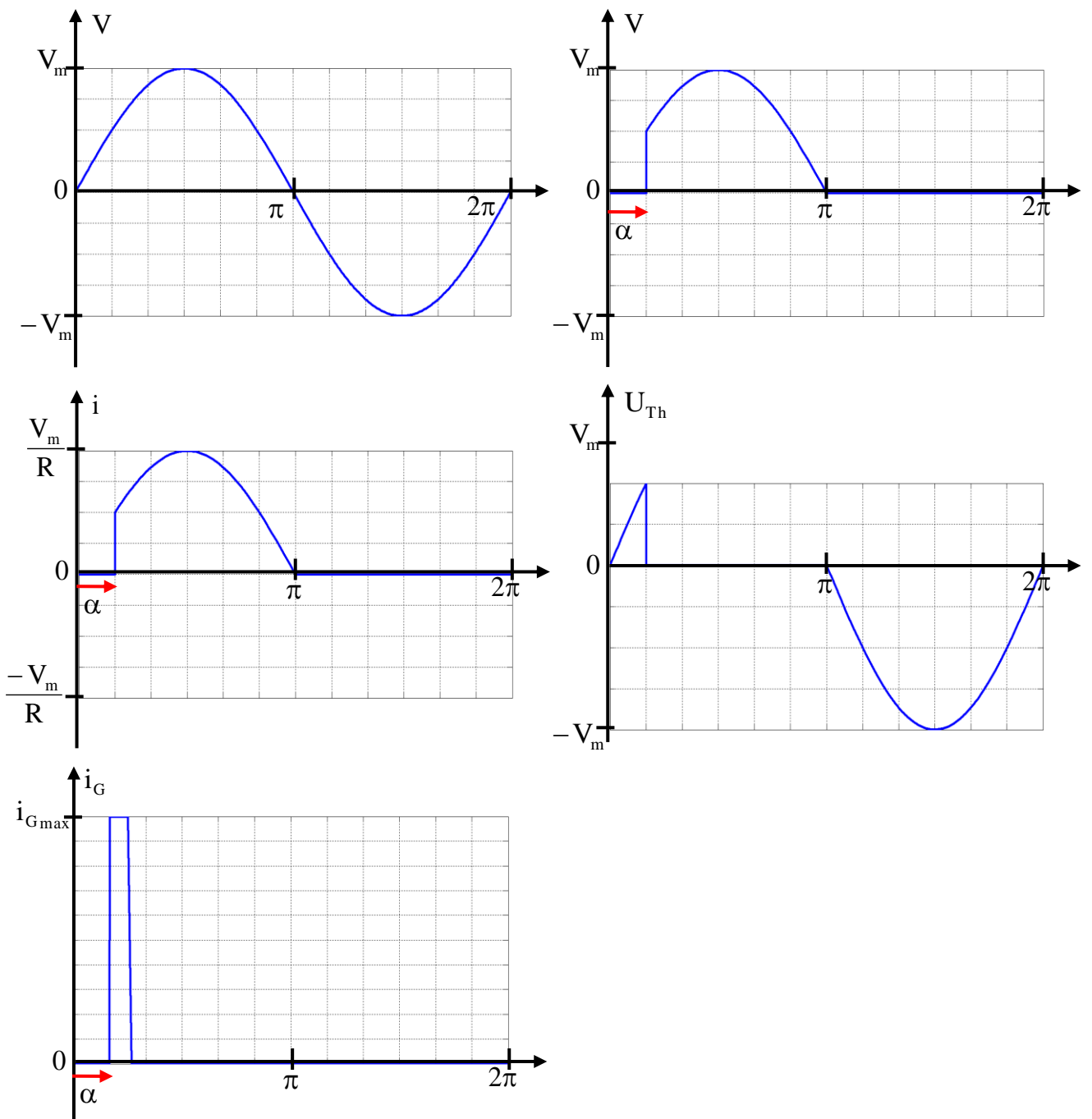
1. Redressement simple alternance, Charge R

Soit α l'angle d'amorçage du thyristor.

a) Analyse du fonctionnement



Intervalles	$0 \rightarrow \alpha$	$\alpha \rightarrow \pi$	$\pi \rightarrow 2\pi$
Thyristor	Th est bloqué	Th est passant	Th est bloqué
Tension redressée	$U=0$	$U=V$	$U=0$
Courant redressé	$i = \frac{U}{R} = 0$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V}{R}$	$i = \frac{U}{R} = 0$
Tension aux bornes du thyristor	$U_{Th}=V$	$U_{Th}=0$	$U_{Th}=V$



b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} V_m \sin(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos(\alpha)) \text{ avec: } T = 2\pi$$

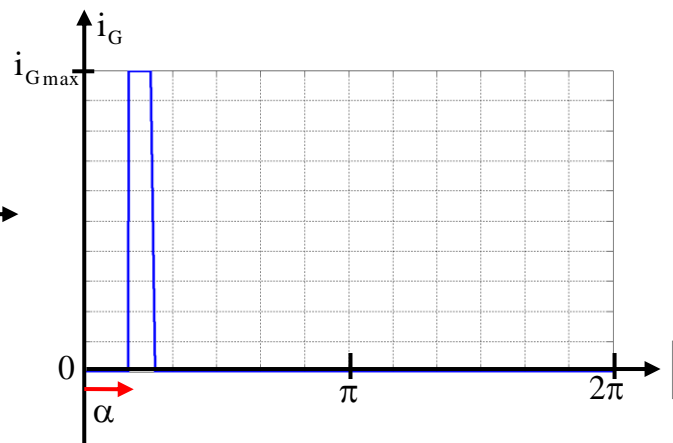
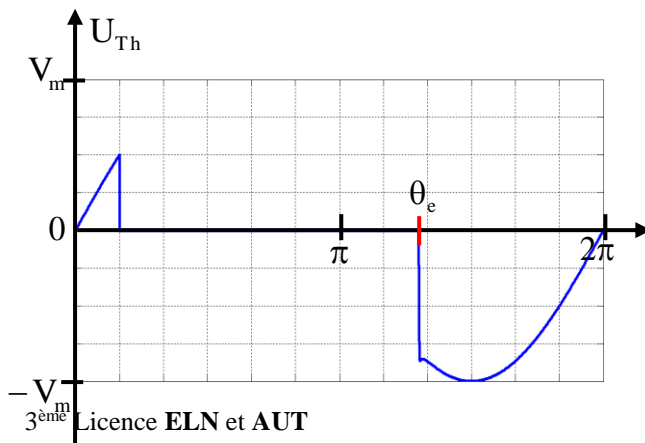
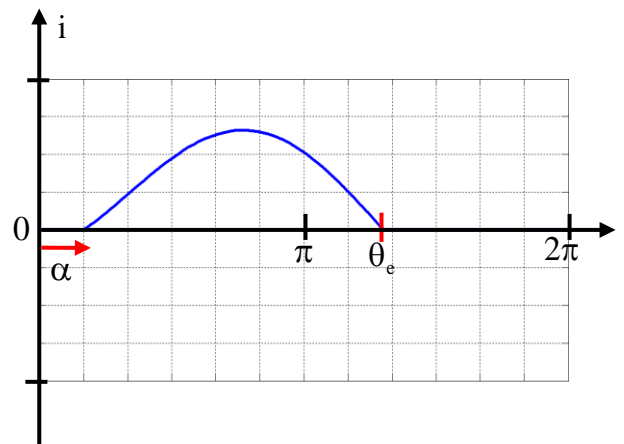
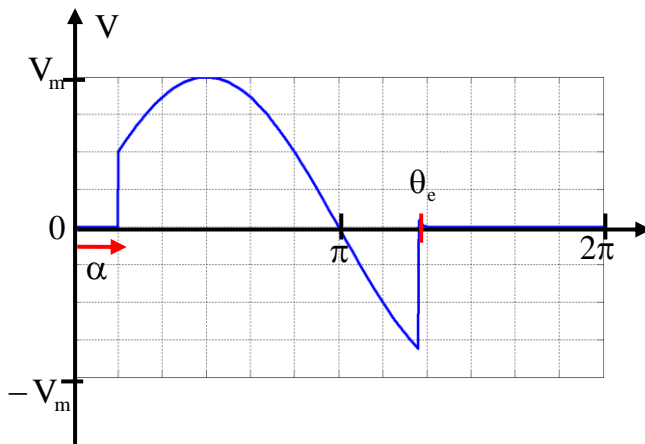
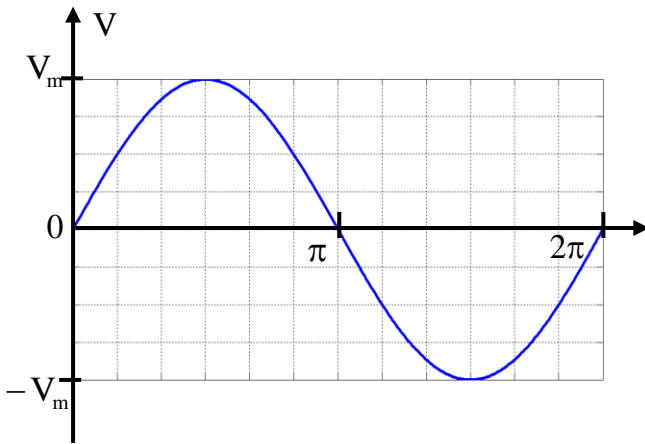
$$i_{\text{moy}} = \frac{V_m}{2\pi R} (1 + \cos(\alpha))$$

c) Valeur efficace

$$U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{\text{eff}}^2 = \frac{1}{T} \int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} V_m^2 \sin^2(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{eff}} = \frac{V_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

$$i_{\text{eff}} = \frac{V_m}{2R} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

II.3.1.1.2 Charge résistive et inductive (R, L)



II.3.1.2 Redressement double alternance (pont de Graëtz monophasé PD2)

II.3.1.2.1 Charge résistive

Ce pont nécessite quatre thyristors (Th_1, Th_2, Th_3, Th_4). La tension d'alimentation $V(t)$ est alternative $V = V_m \sin(\omega t)$.

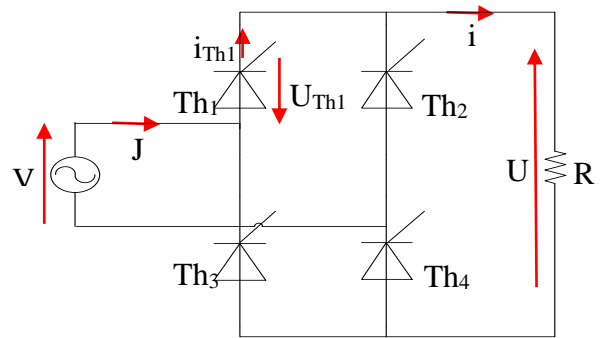
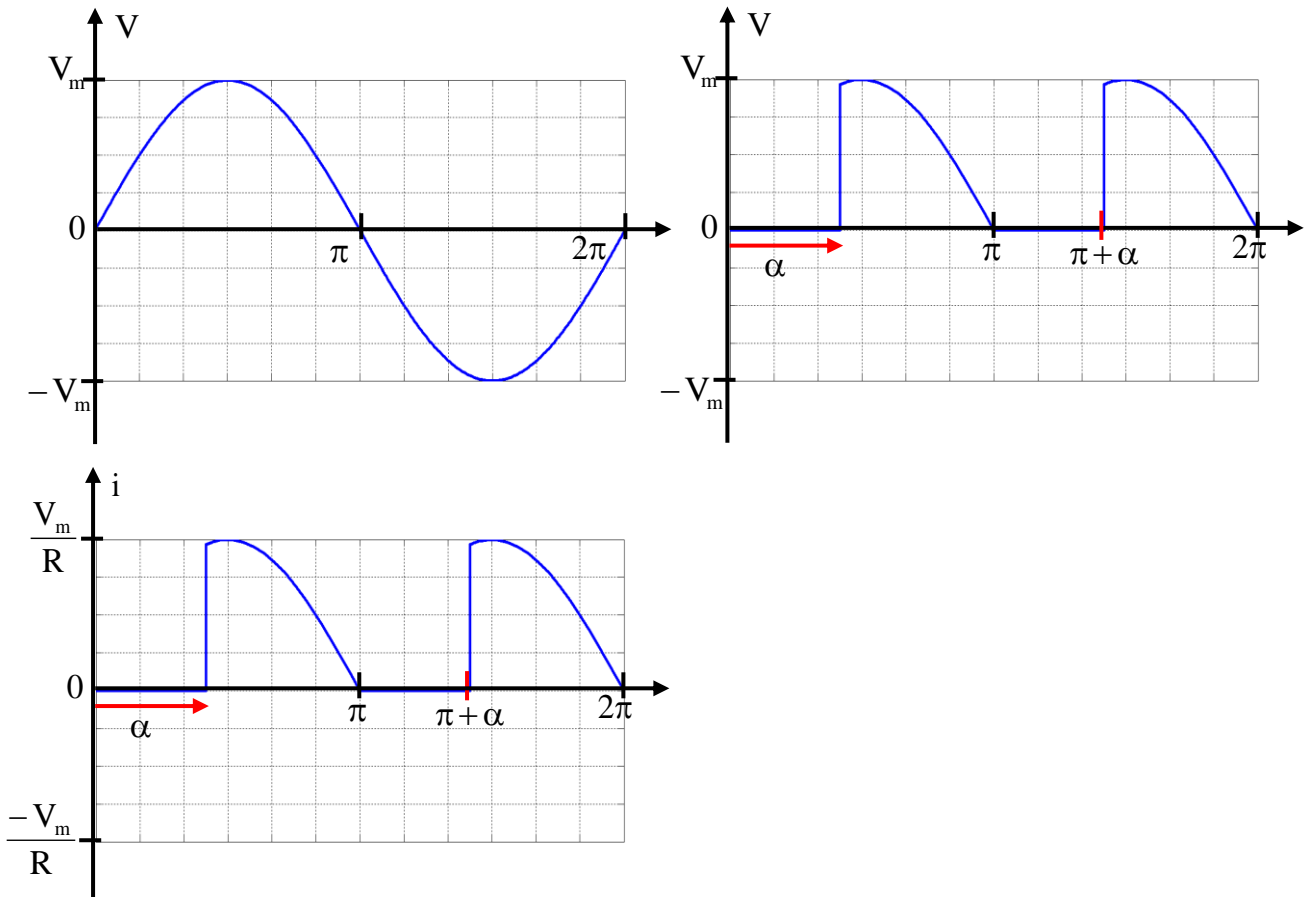


Figure 2.12: Schéma du redresseur à thyristors PD2 (Charge résistive)

a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$0 \rightarrow \alpha$	$\alpha \rightarrow \pi$
Thyristors passants	/	Th_1 et Th_4
Tension redressée	$U=0$	$U=V$
Courant redressé	$i = \frac{U}{R} = 0$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V}{R}$
Tension aux bornes du thyristor Th_1	$U_{Th}=V$	$U_{Th}=0$

Intervalles	$\pi \rightarrow \alpha + \pi$	$\alpha + \pi \rightarrow 2\pi$
Thyristors passants	/	Th_2 et Th_3
Tension redressée	$U=0$	$U=-V$
Courant redressé	$i = \frac{U}{R} = 0$	$i = \frac{U}{R} = -\frac{V}{R}$
Tension aux bornes du thyristor Th_1	$U_{Th}=V$	$U_{Th}=V$



b) Valeur moyenne

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{moy} = \frac{2}{T} \int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} V_m \sin(\omega t) dt \rightarrow U_{moy} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

$$i_{moy} = \frac{V_m}{\pi R} (1 + \cos(\alpha))$$

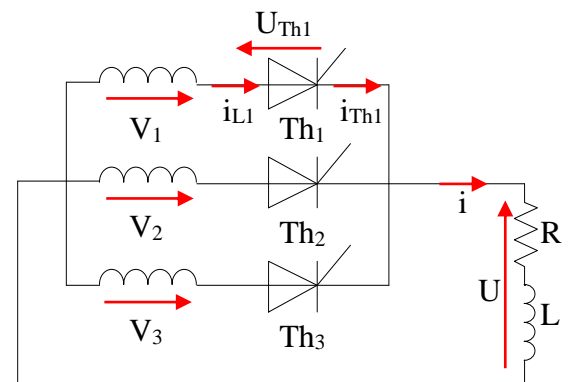
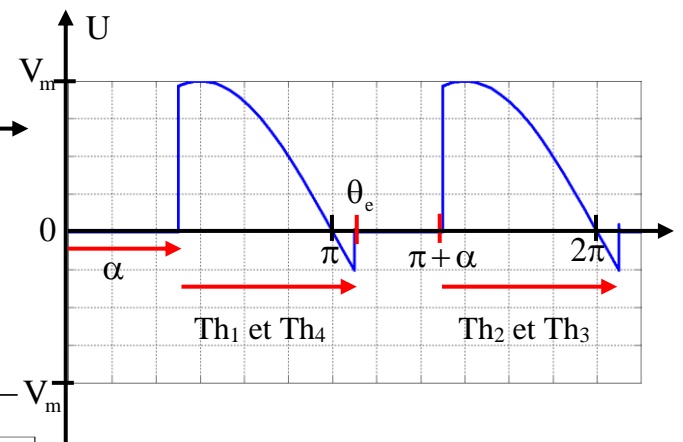
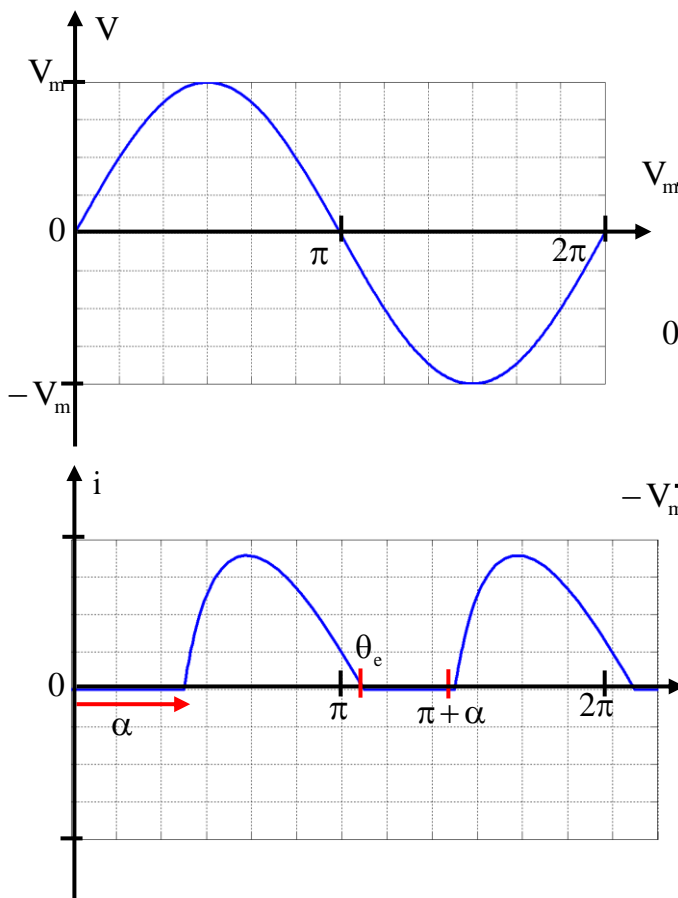
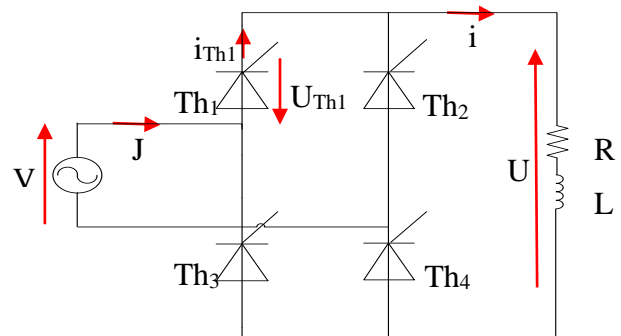
c) Valeur efficace

$$U_{eff}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt \rightarrow U_{eff}^2 = \frac{2}{T} \int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} V_m^2 \sin^2(\omega t) dt \rightarrow U_{eff} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

$$i_{eff} = \frac{V_m}{R\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

II.3.1.2.2 Charge résistive et inductive

Si l'inductance est assez grande, on peut considérer le lissage comme parfait : le courant i est constant.



II.3.2 Redresseurs triphasés à thyristors

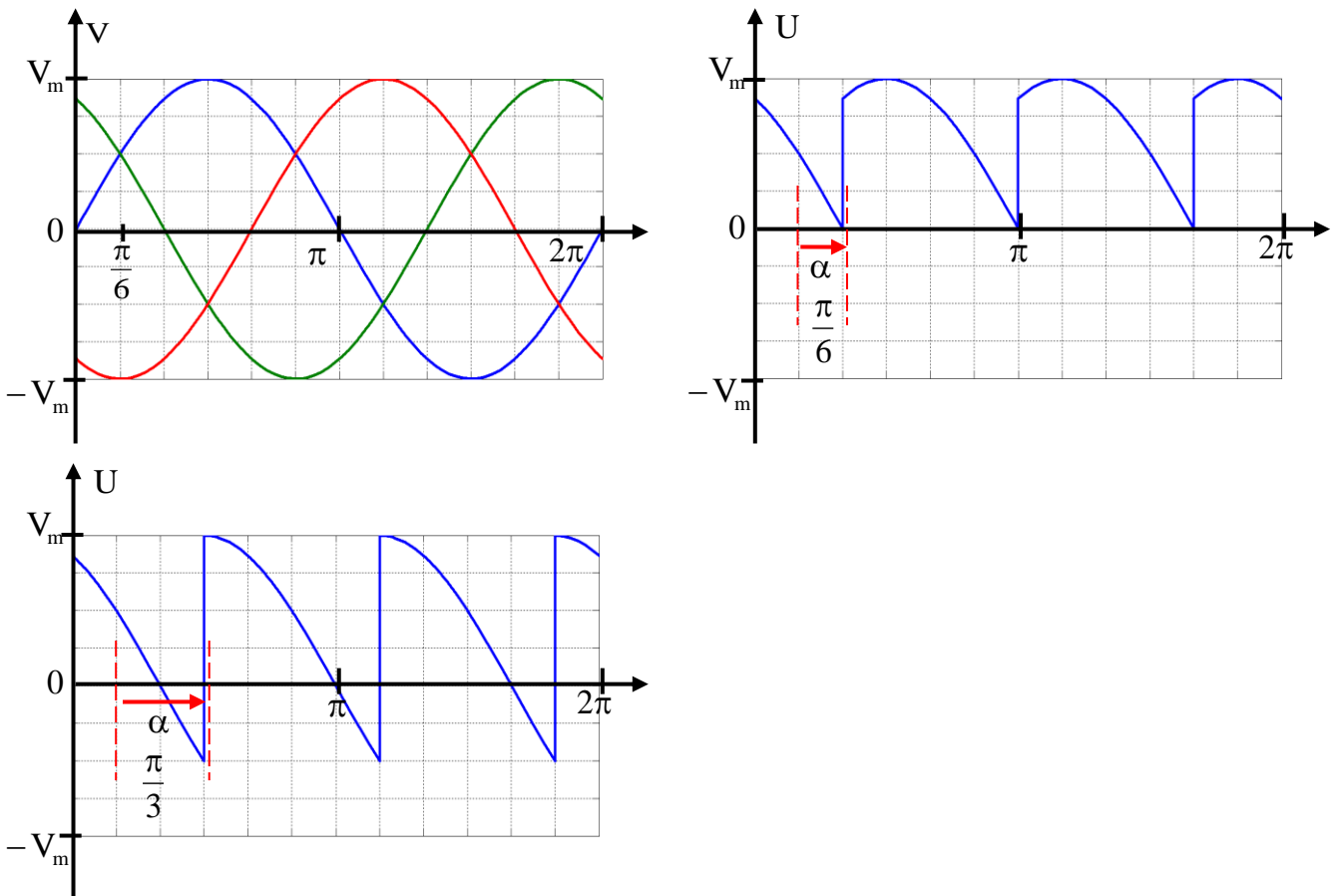
II.3.2.1 Redresseur parallèle simple P3

Figure 2.14: Redresseur simple alternance Montage P3 à thyristors (Charge résistive et inductive)

La figure 2.14 représente le montage P3 à thyristors. Chaque thyristor est raccordé sur une phase ($V_1 = V_m \sin(\omega t)$, $V_2 = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$ et $V_3 = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$), les cathodes sont communes et raccordées sur la charge. Le retour au transformateur s'effectue par le neutre.

a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$\frac{\pi}{6} + \alpha \rightarrow \frac{5\pi}{6} + \alpha$	$\frac{5\pi}{6} + \alpha \rightarrow \frac{9\pi}{6} + \alpha$	$\frac{9\pi}{6} + \alpha \rightarrow \frac{13\pi}{6} + \alpha$
Thyristors passants	Th ₁	Th ₂	Th ₃
Tension redressée	$U = V_1$	$U = V_2$	$U = V_3$



b) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{3}{T} \int_{\frac{T}{12} + \alpha}^{\frac{5T}{12} + \alpha} V_1(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{3}{T} \int_{\frac{T}{12} + \alpha}^{\frac{5T}{12} + \alpha} V_m \sin(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{2\pi} \cos(\alpha)$$

Pour $0 < \alpha < 90^\circ$: La tension redressée est positive, et la puissance active ($P_a = U_{\text{moy}} * i > 0$) fournie par le redresseur à la charge est positive. La charge absorbe donc de l'énergie et le montage fonctionne en tant que **redresseurs** à tension redressée variable en fonction du retard d'amorçage α .

Pour $90^\circ < \alpha < 180^\circ$: La tension redressée est négative, et la puissance active ($P_a = U_{moy} \cdot i < 0$) est négative. La charge n'est plus un récepteur mais un générateur. L'énergie passe du côté continu au côté alternatif. Le montage fonctionne en **onduleur**.

II.3.2.2 Redresseur parallèle simple P3 à thyristors avec diode de roue libre

Une diode de roue libre est montée en cathode commune en sortie du montage. Elle conduit quand U tend à être négatif. Ainsi, elle écrête les valeurs négatives de U.

Le circuit de commande est identique au précédent.

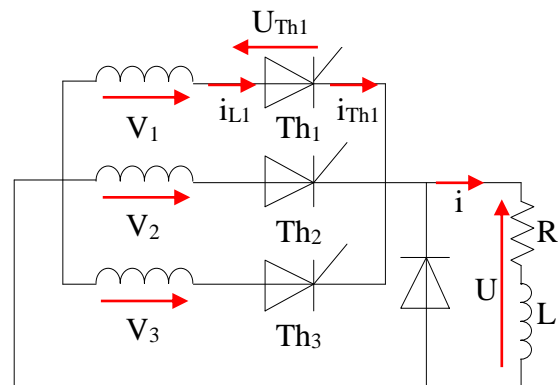
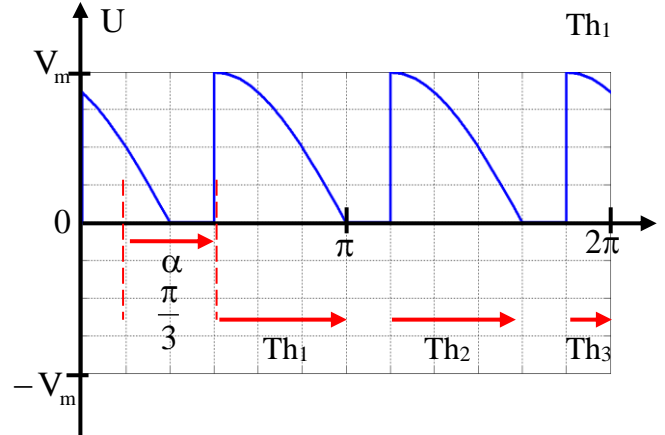
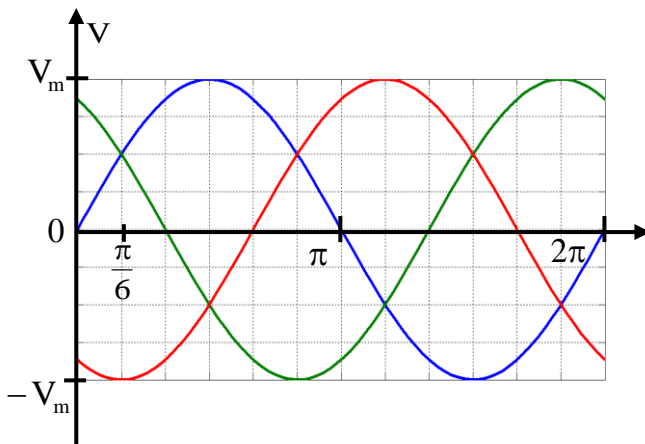


Figure 2.15: Montage P3 à thyristors avec diode de roue libre (Charge résistive et inductive)



II.3.2.3 Redresseur parallèle double PD3 à thyristors

Le montage redresseur PD3 à thyristors est constitué de six thyristors, connectés deux par deux en inverse. Il peut être vu comme une combinaison de 2 redresseurs P3.

$$U = U_{AN} - U_{BN}$$

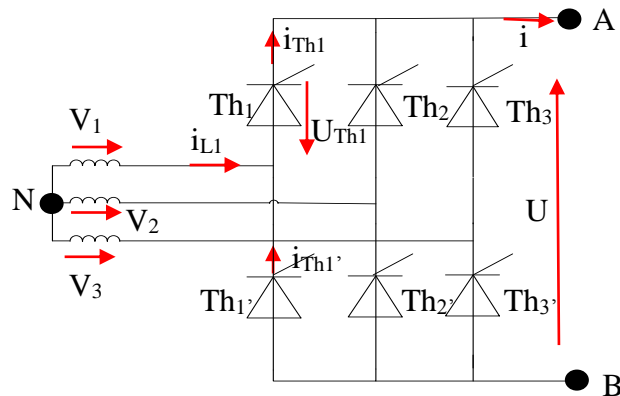


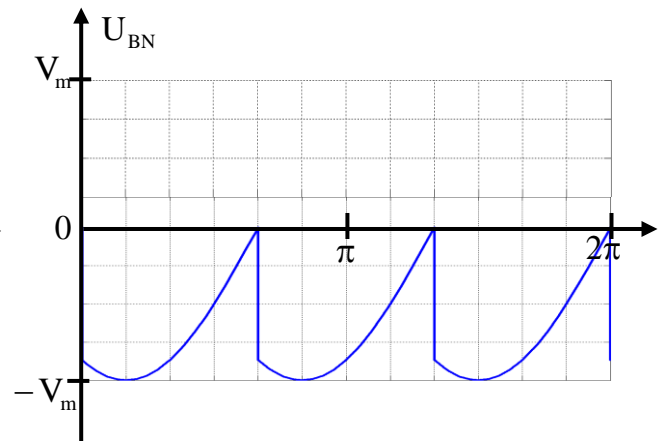
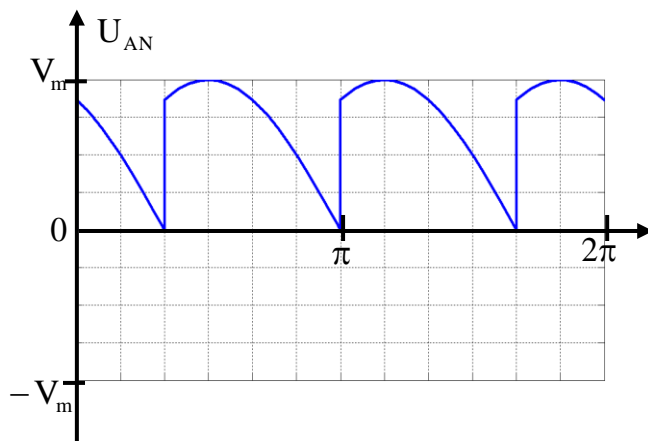
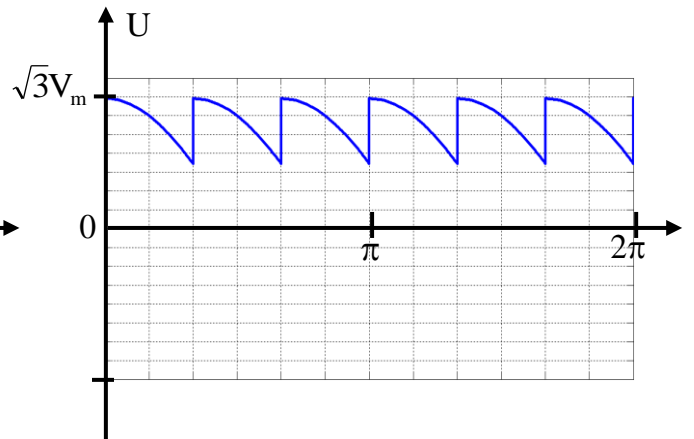
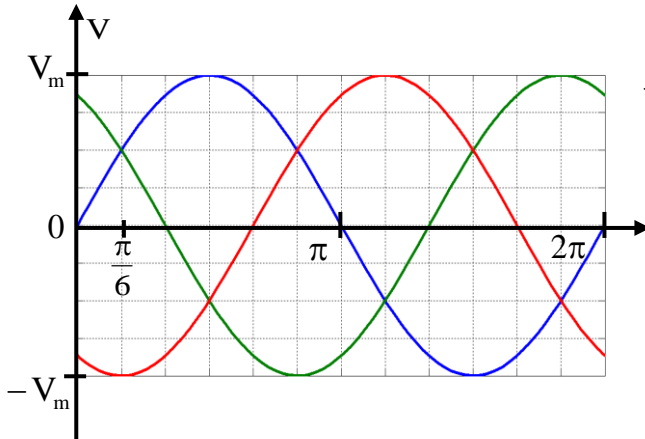
Figure 2.16: Schéma du redresseur PD3 à thyristors

a) Analyse du fonctionnement

Intervalles	$\frac{\pi}{6} + \alpha \rightarrow \frac{3\pi}{6} + \alpha$	$\frac{3\pi}{6} + \alpha \rightarrow \frac{5\pi}{6} + \alpha$	$\frac{5\pi}{6} + \alpha \rightarrow \frac{7\pi}{6} + \alpha$
Thyristors passants	Th ₁ et Th ₂ '	Th ₁ et Th ₃ '	Th ₂ et Th ₃ '
Tension redressée	$U = V_1 - V_2$	$U = V_1 - V_3$	$U = V_2 - V_3$

Intervalles	$\frac{7\pi}{6} + \alpha \rightarrow \frac{9\pi}{6} + \alpha$	$\frac{9\pi}{6} + \alpha \rightarrow \frac{11\pi}{6} + \alpha$	$\frac{11\pi}{6} + \alpha \rightarrow \frac{13\pi}{6} + \alpha$
Thyristors passants	Th ₂ et Th ₁ '	Th ₃ et Th ₁ '	Th ₃ et Th ₂ '
Tension redressée	$U=V_2-V_1$	$U=V_3-V_1$	$U=V_3-V_2$

$$\alpha = \frac{\pi}{6}$$



b) Valeur moyenne

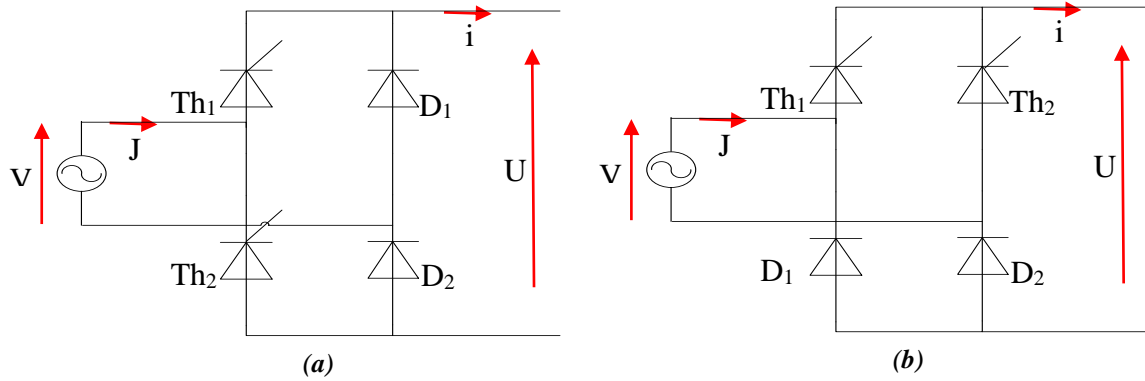
$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{6}{T} \int_{\frac{T}{12} + \alpha}^{\frac{3T}{12} + \alpha} V_1 - V_2(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{6}{T} \int_{\frac{T}{12} + \alpha}^{\frac{5T}{12} + \alpha} (V_m \sin(\omega t) - V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})) dt$$

$$\rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \cos(\alpha)$$

II.4 Redresseur mixte

II.4.1 Redresseur mixte double alternance PD2

Il y a deux architectures possibles pour un pont mixte :



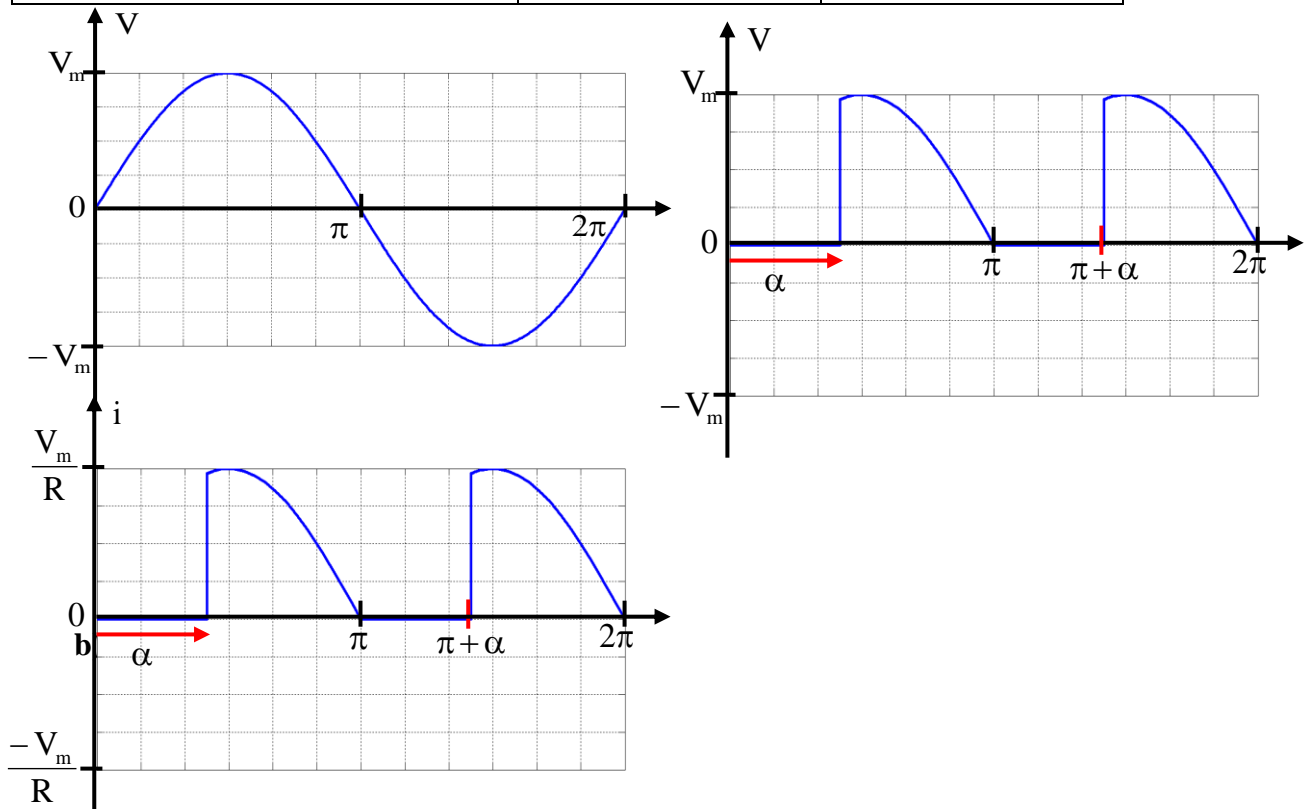
Redresseur mixte double alternance PD2

II.4.1.1 Charge résistive

a) Analyse du fonctionnement (figure. b)

Intervalles	$0 \rightarrow \alpha$	$\alpha \rightarrow \pi$
Éléments passants	D ₂	Th ₁ et D ₂
Tension redressée	$U=0$	$U=V$
Courant redressé	$i = \frac{U}{R} = 0$	$i = \frac{U}{R} = \frac{V}{R}$

Intervalles	$\pi \rightarrow \alpha + \pi$	$\alpha + \pi \rightarrow 2\pi$
Éléments passants	D ₁	Th ₂ et D ₁
Tension redressée	$U=0$	$U=-V$
Courant redressé	$i = \frac{U}{R} = 0$	$i = \frac{U}{R} = -\frac{V}{R}$



$$U_{\text{moy}} = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{2}{T} \int_{\alpha}^{\frac{T}{2}} V_m \sin(\omega t) dt \rightarrow U_{\text{moy}} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

$$i_{\text{moy}} = \frac{V_m}{\pi R} (1 + \cos(\alpha))$$

II.4.1.2 Charge R, L (lissage du courant)

Dans le cas où la valeur de l'inductance est importante ($L \rightarrow \infty$), le courant redressé se ramène à sa valeur moyenne ; il est donc continu.

II.4.2 Etude du montage redresseur parallèle double PD3 (pont mixte)

On reprend le montage du montage PD3 (pont complet tout thyristors) et on remplace les thyristors $Th1'$, $Th2'$ et $Th3'$ par des diodes. Les thyristors fonctionnent avec un retard d'amorçage de 30° par rapport à l'amorçage naturel.

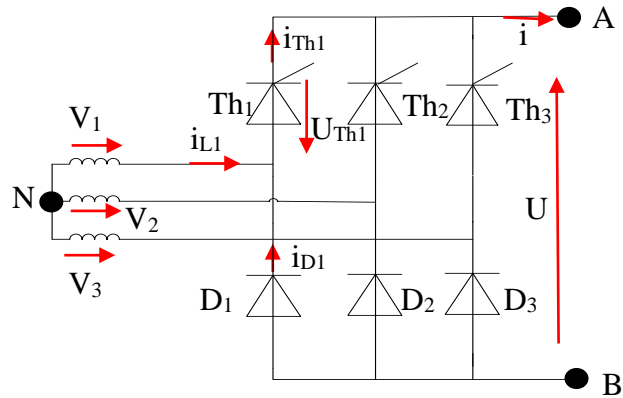
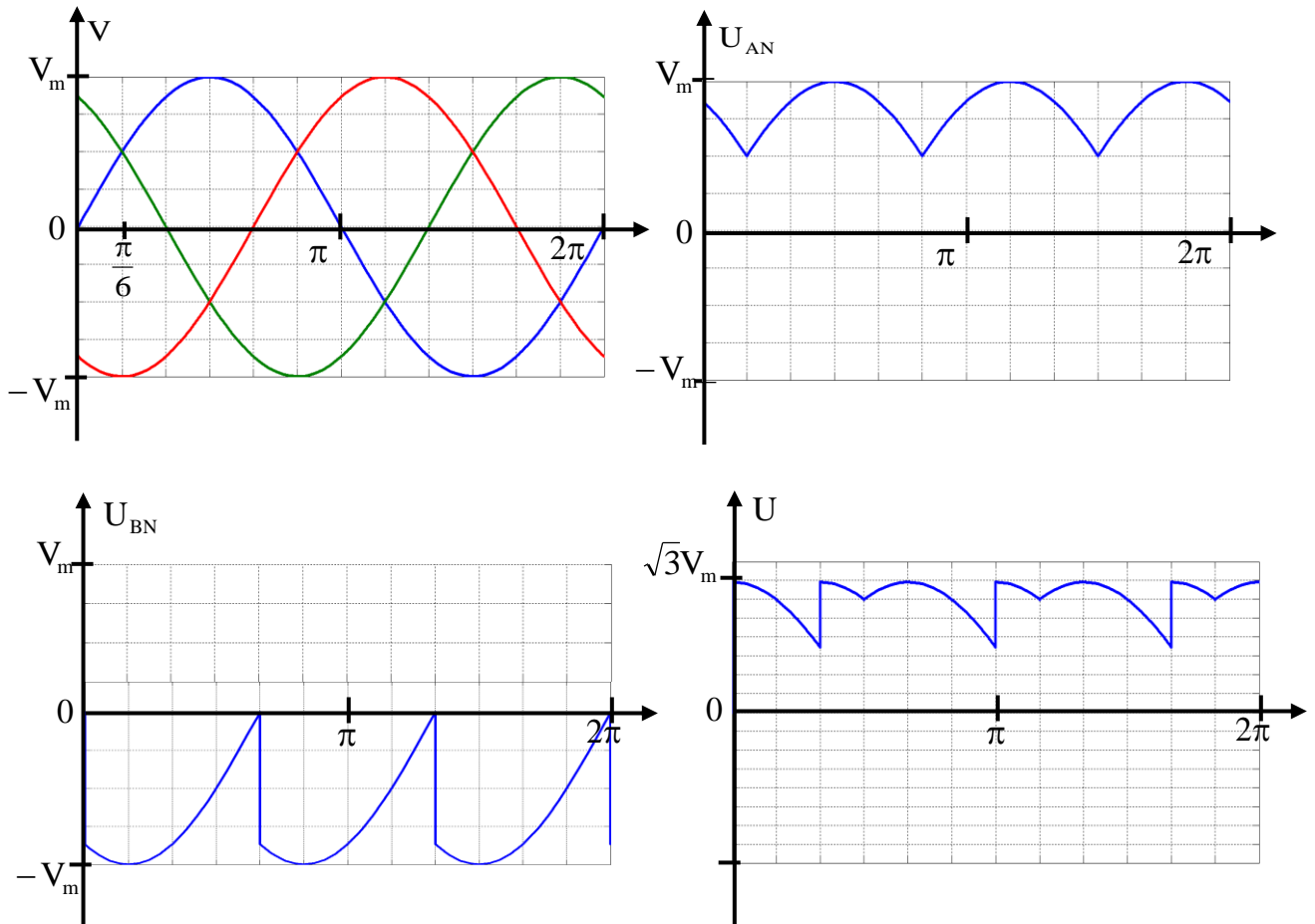


Figure 2.18: Schéma du redresseur PD3(pont mixte)



a) Valeur moyenne

$$U_{\text{moy}} = U_{\text{AN}} - U_{\text{BN}} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

II.5 Chutes de tension en charge (fonctionnement normal)

Jusqu'ici nous avons supposé la source et le redresseur parfaits. En fait, les impédances des éléments du redresseur et celle du réseau qu'il alimente entraînent une diminution de la valeur moyenne U.

La chute de tension totale est obtenue en ajoutant:

- la chute due aux commutations (empiétements) $\Delta_1 U$;
- la chute due aux résistances $\Delta_2 U$;
- la chute due aux diodes $\Delta_3 U$.

Avec: $\Delta U = \Delta_1 U + \Delta_2 U + \Delta_3 U$

Surtout pour les montages de forte puissance, c'est le phénomène d'empiétement lors des commutations qui est à l'origine de la principale chute de tension.

II.5.1 Chutes de tension inductives dues à la commutation des diodes: phénomène d'empiétement

- En réalité, les enroulements primaire et secondaire du transformateur présentent des inductances de fuite.
- En conséquence, l'intensité du courant ne peut varier de façon discontinue dans ces éléments et la commutation ne peut être instantanée.

A l'instant t_0 où $V_1(t)=V_2(t)$, les diodes commutent pendant la durée τ . D_1 et D_2 conductrices,

$$U = V_1 - L \frac{di_{D1}}{dt} = V_2 - L \frac{di_{D2}}{dt}. \quad \text{On a:} \quad i_{D1} + i_{D2} = i \Rightarrow \frac{di_{D1}}{dt} + \frac{di_{D2}}{dt} = 0. \quad \text{D'où}$$

$$U = V_1 - L \frac{di_{D1}}{dt} = V_2 + L \frac{di_{D1}}{dt} \Rightarrow U = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

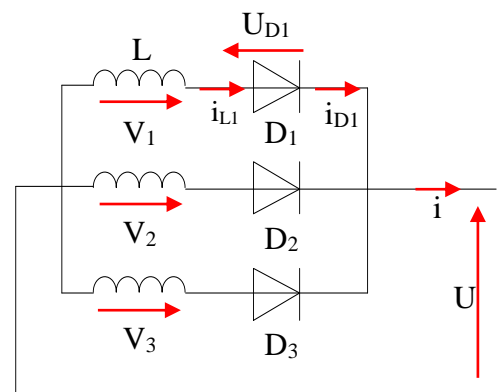
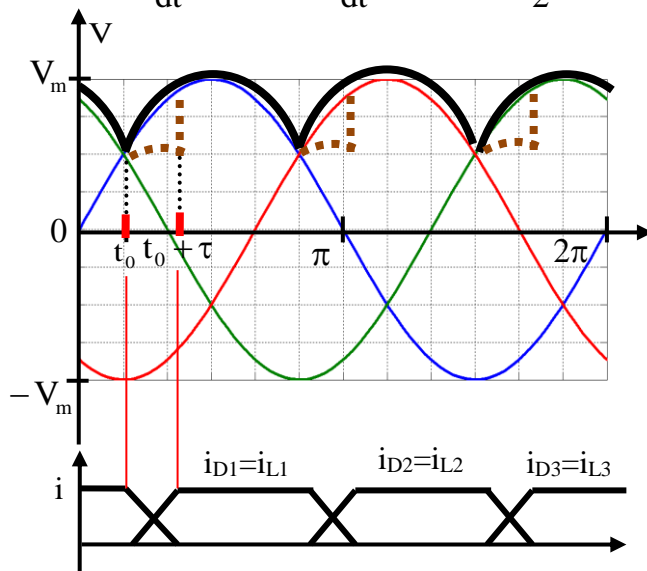


Figure 2.19: Redresseur simple alternance. Montage P3

Pendant la durée τ de l'empiétement la tension redressée vaut donc $\frac{V_1 + V_2}{2}$ au lieu de V_2 .

Au delà de l'instant $t_0 + \tau$ on a: $i_{D1} = 0$, $i_{D2} = i$ et $U = V_2$.

L'empiétement se traduit donc par une chute de tension instantanée:

$$\Delta_1 U = V_2 - \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{V_2 - V_1}{2} = L \frac{di_{D2}}{dt}$$

$$\text{La valeur moyenne } \Delta_1 U = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} \left(\frac{V_2 - V_1}{2} \right) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + \tau} L \frac{di_{D2}}{dt} dt = \frac{L\omega}{2\pi} i$$

❖ **La durée (τ) de l'empiétement (Cas général)**

$$\tau = \arccos \left[1 - \frac{\sqrt{2}L\omega}{V_{\text{eff}} \sin(m)} i \right], \quad m = \left(\frac{\pi}{q} \right)$$

❖ **Cas général : redresseur quelconque**

La chute de tension par commutation est proportionnelle au courant i , à la réactance $L\omega$ et aussi au nombre q de phases : $\Delta_1 U = \frac{L\omega}{2\pi} qi$

✓ **Chute de tension ohmique**

$$\Delta_2 U = R_s * i_L$$

R_s étant la résistance du transformateur ramenée au secondaire et i_L l'intensité du courant dans un enroulement secondaire.

✓ **Chute de tension due aux diodes**

$$\Delta_3 U = V_{\text{seuil}} + R_D * i_D$$

❖ **La durée (τ) de l'empiétement (thyristors)**

$$\cos(\alpha) - \cos(\alpha + \tau) = \frac{L\omega}{V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right)} i$$

II.6 Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Lorsque la tension est présente, les principaux phénomènes pouvant l'affecter sont d'une part les variations lentes : creux de tension, surtensions, coupures, déséquilibres et d'autre part des variations rapides : surtensions transitoires, flicker ainsi que les harmoniques. La qualité des courants reflète par contre la possibilité des charges à fonctionner sans perturber ni réduire l'efficacité du système de puissance. C'est pourquoi certains considèrent que la qualité de l'électricité se réduit à la qualité de la tension.

La qualité de l'alimentation électrique ou qualité de l'onde fait référence à la mesure du degré

de conformité d'une source d'alimentation électrique par rapport à un certain nombre de critères ou de normes à caractère quantitatif et absolu. L'énergie électrique est délivrée sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont les suivants :

- la fréquence,
- l'amplitude,
- la forme d'onde qui doit être sinusoïdale,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

Tout phénomène physique affectant une ou plusieurs de ces caractéristiques peut être considéré comme perturbation. En pratique, ces perturbations sont classées selon la durée du phénomène. Ainsi, il est possible de distinguer :

- ✓ les altérations de l'onde de tension (harmoniques, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes,
- ✓ les creux de tension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes,
- ✓ les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période.