

LU3EE104 : Réseaux électriques et Electronique de puissance

V. CONVERSION AC/DC, LES REDRESSEURS

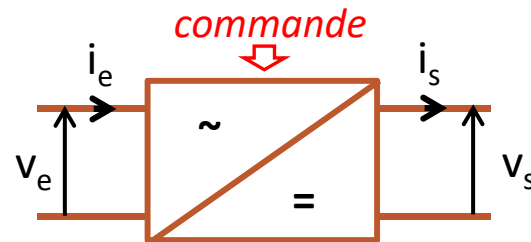
Ouvrage de référence :

Electronique de puissance, 2^e édition - Luc Lasne

Editions Dunod - ISBN 978-2-10-072135-1

V. Conversion AC/DC : les redresseurs

Redresseur : circuit destiné à la production d'une tension ou d'un courant continu à partir d'une source alternative



Plan du cours :

- Redressement simple alternance
- Redressement double alternance
- Discussion sur les puissances et la réversibilité

Où a-t-on besoin de redresseurs ?

Je vous écoute :

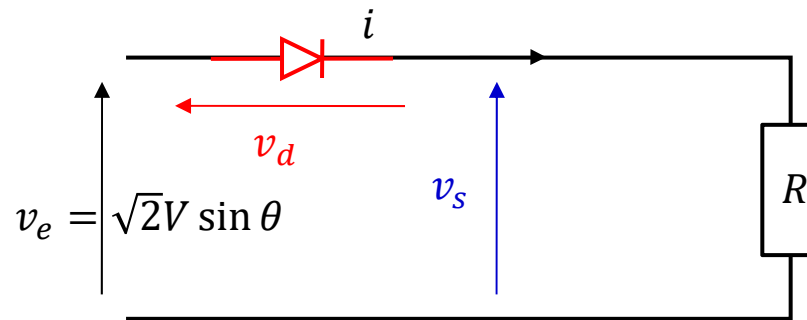
- chargeur de téléphone (réseau AC / charge continue), machine à laver, ordinateur, etc...
- métro, tramways (20 kV AC \Rightarrow 750 V DC)
- comment se fait la connexion entre réseau français et réseau anglais ?
Par liaison DC, donc besoin de conversion AC/DC et DC/AC
-

Pour commencer, nous allons nous intéresser au *redressement simple alternance*, avec deux objectifs :

- revoir le fonctionnement de la diode
- introduire le thyristor

I. Redressement simple alternance

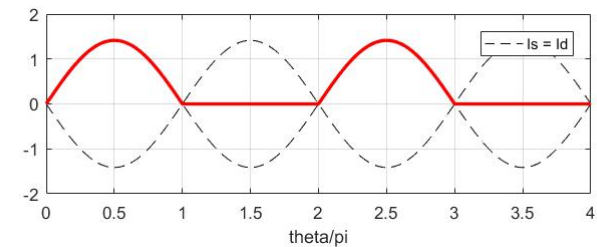
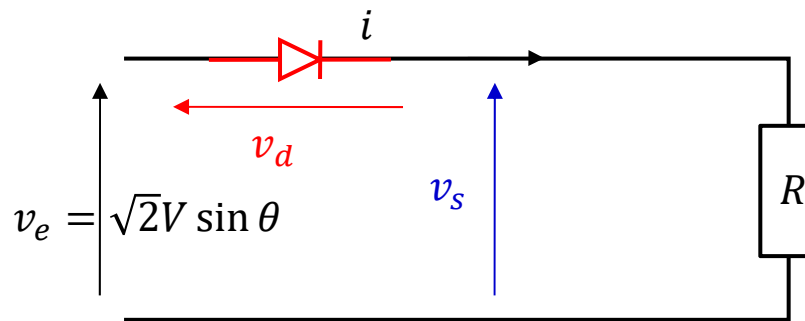
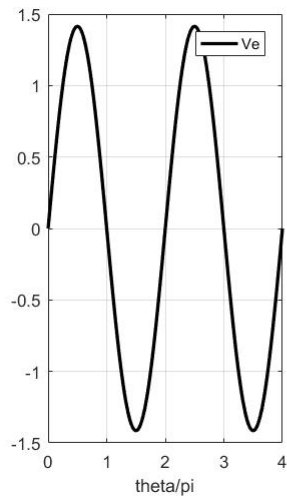
Commençons par un cas très simple : circuit à diode sur charge R



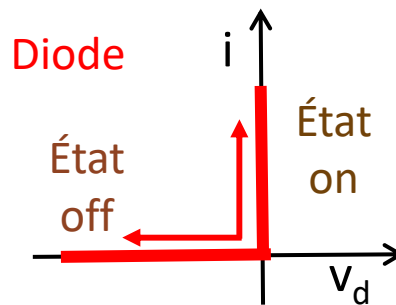
- Quelqu'un peut-il prendre la parole pour expliquer comment ça fonctionne ?

I. Redressement simple alternance

Commençons par un cas très simple : circuit à diode sur charge R



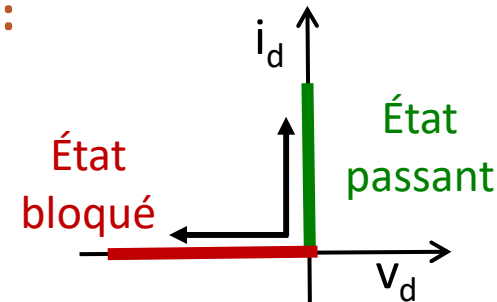
Tension
d'entrée
sinusoïdale



Tension de
sortie
redressée

I. Redressement simple alternance

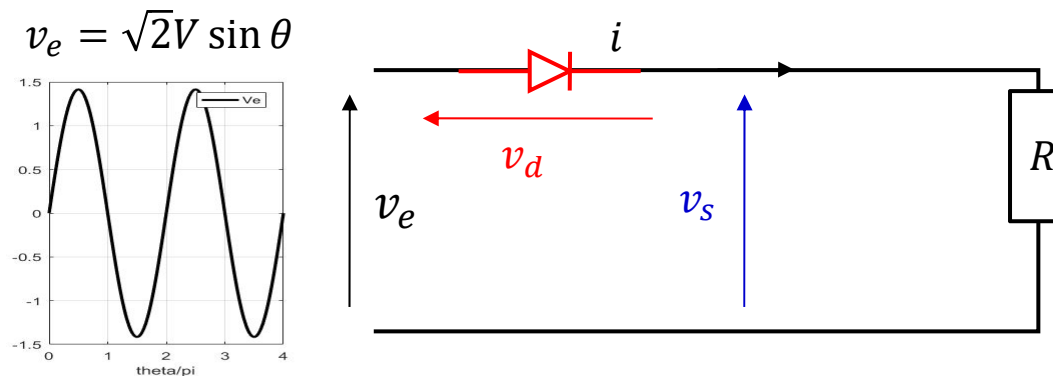
Rappel sur le fonctionnement de la diode :



- L'état de la diode est *imposé par le circuit extérieur*
 - À l'état bloqué: courant $i_d = 0$ et tension $v_d < 0$
 - A l'état passant: tension $v_d = 0$ et courant $i_d > 0$
- Comment déterminer l'état ?
 - On fait une hypothèse et on examine si cela conduit à une impossibilité
 - Ex : hypothèse état bloqué
 - courant $i_d = 0 \Rightarrow$ calcul de v_d
 - Si on obtient $v_d < 0$, c'est que l'hypothèse est juste (état bloqué)
 - Si on obtient $v_d > 0$, c'est que l'hypothèse est fausse (état passant)

I. Redressement simple alternance

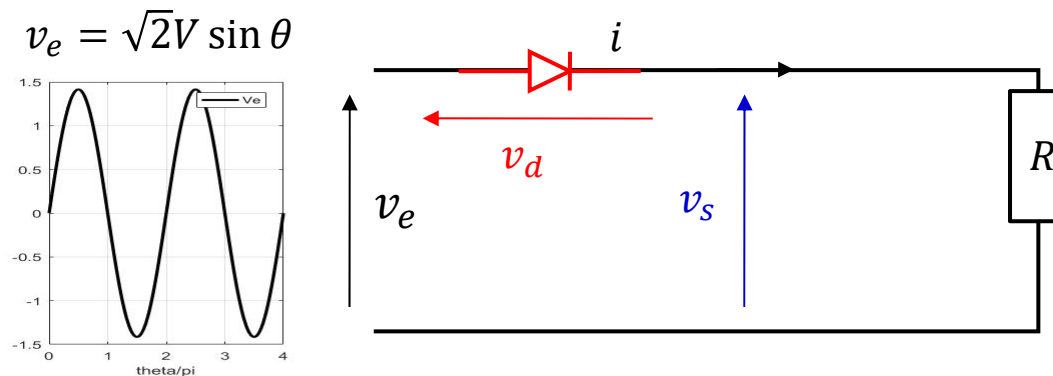
Circuit à diode sur charge R :



- Sur l'intervalle $[0, \pi[$: $v_e(\theta) > 0$
 - Faisons l'hypothèse « diode bloquée » : alors $i(\theta) = 0$, et donc $v_s(\theta) = 0$
Donc $v_d(\theta) = v_e(\theta) > 0$ contradictoire avec l'hypothèse « diode bloquée »
Donc la diode est passante : $v_d(\theta) = 0$, donc $v_s(\theta) = v_e(\theta) > 0$
Or $i(\theta) = \frac{1}{R} v_s(\theta) > 0$, donc $i(\theta) > 0$, donc en effet, la diode est passante

I. Redressement simple alternance

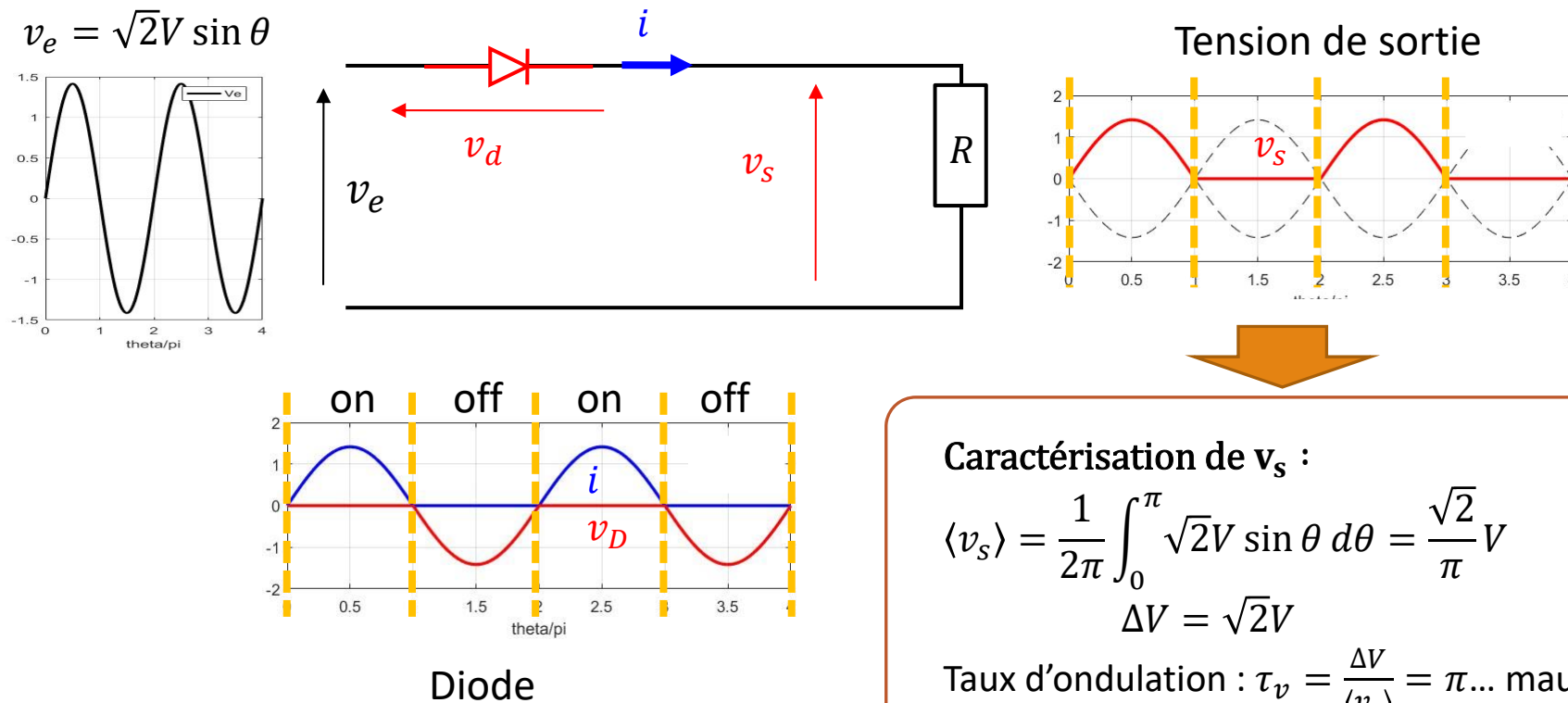
Circuit à diode sur charge R :



- **Sur l'intervalle $[\pi, 2\pi[$: $v_e(\theta) < 0$**
 - Faisons l'hypothèse « diode bloquée » : alors $i(\theta) = 0$, et donc $v_s(\theta) = 0$
Donc $v_d(\theta) = v_e(\theta) < 0$, compatible avec l'hypothèse « diode bloquée »

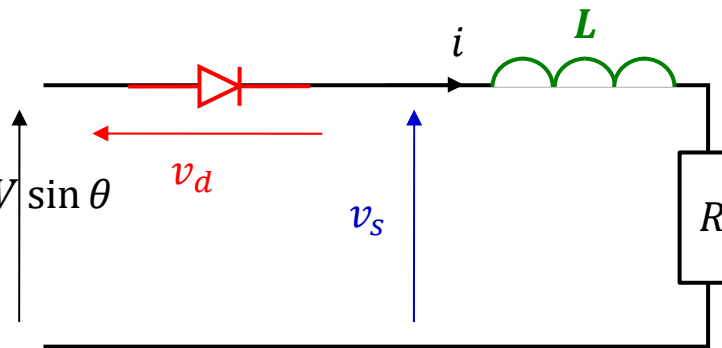
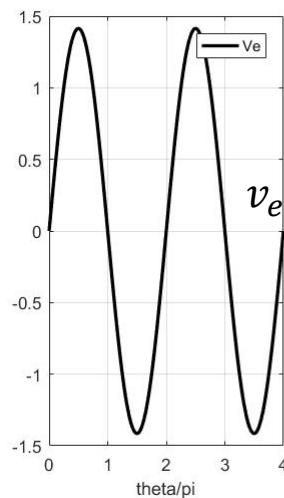
I. Redressement simple alternance

Circuit à diode sur charge R : chronogrammes du courants et des tensions



I. Redressement simple alternance

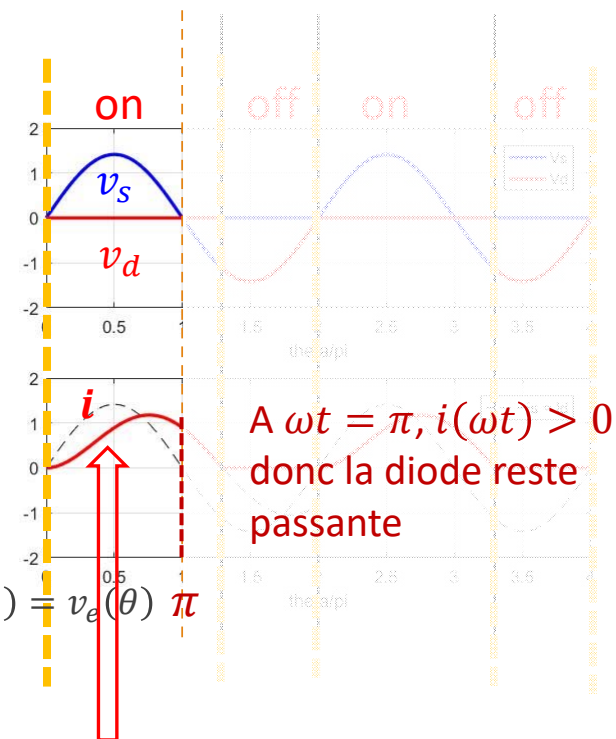
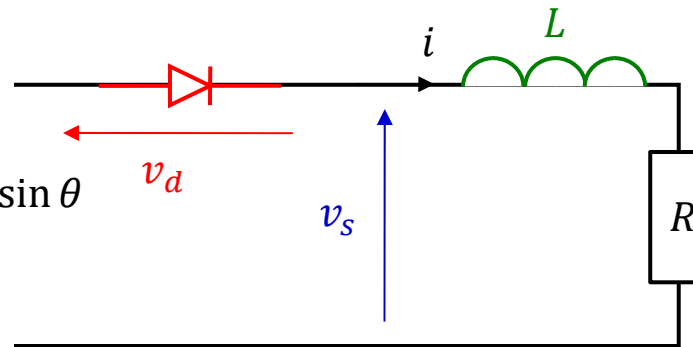
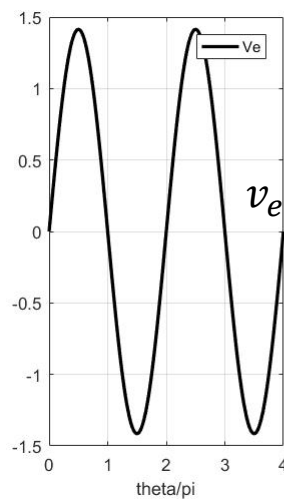
Circuit à diode sur charge R+L : *courant en retard sur la tension*



A votre avis :
quelle conséquence ce retard du courant a-t-il sur
les grandeurs de sortie ?

I. Redressement simple alternance

Circuit à diode sur charge R+L : *courant en retard sur la tension*



○ Sur l'intervalle $[0, \pi[$: $v_e(\theta) > 0$

○ Faisons l'hypothèse « diode passante » : $v_d(\theta) = 0$, donc $v_s(\theta) = v_e(\theta)$

Le courant est régi par l'équation différentielle

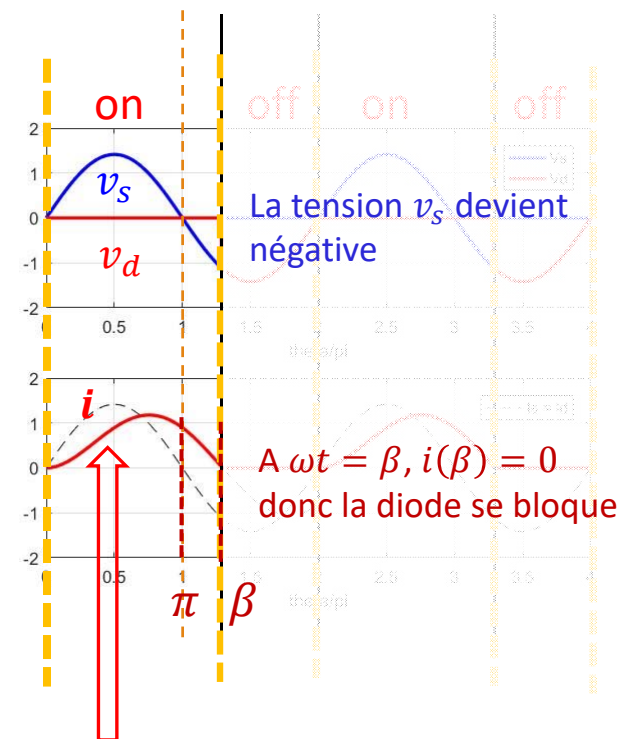
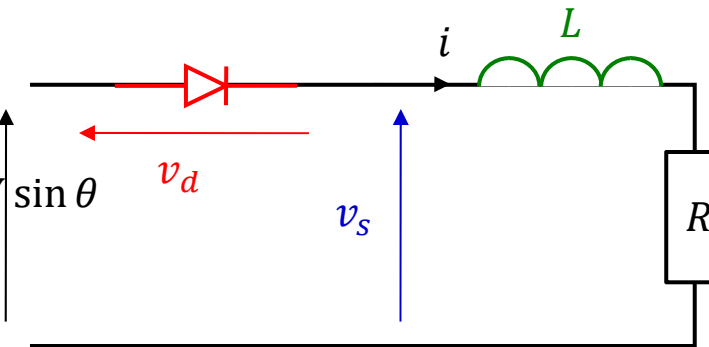
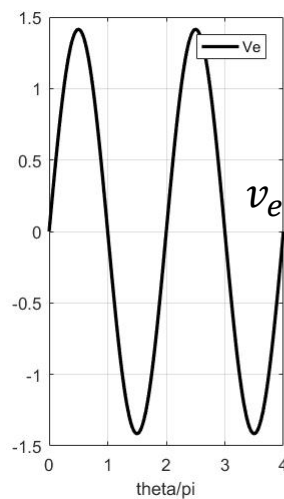
$$L \frac{di}{dt}(t) + Ri(t) = v_s(t) = \sqrt{2}V \sin(\omega t)$$

Après résolution, on obtient : $i_s(t) = V\sqrt{2} \left[\frac{R}{R^2 + L^2\omega^2} \sin \omega t - \frac{L\omega}{R^2 + L^2\omega^2} \cos \omega t \right] + K e^{-\frac{R}{L}t}$

Condition initiale : $i_s(t) = 0$, utilisé pour déterminer la constante K

I. Redressement simple alternance

Circuit à diode sur charge R+L : *courant en retard sur la tension*



Sur l'intervalle $[\pi, \beta[$: $v_e(\theta) < 0$

La diode reste passante : $v_d(\theta) = 0$, donc $v_s(\theta) = v_e(\theta)$

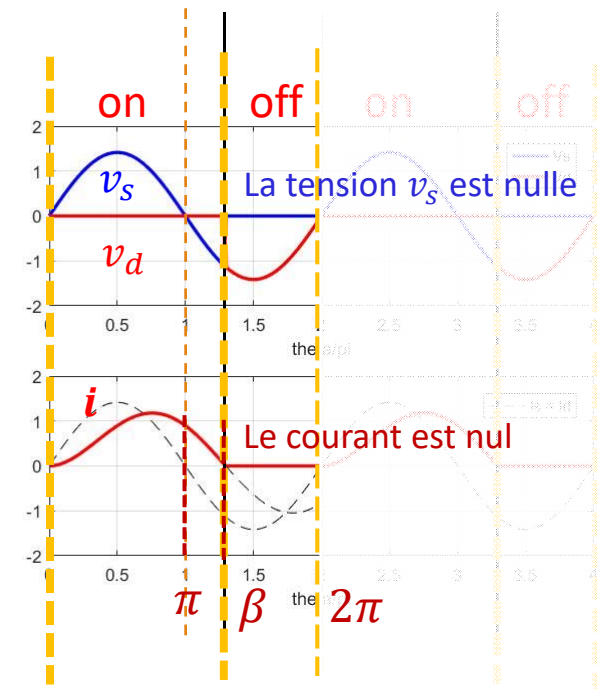
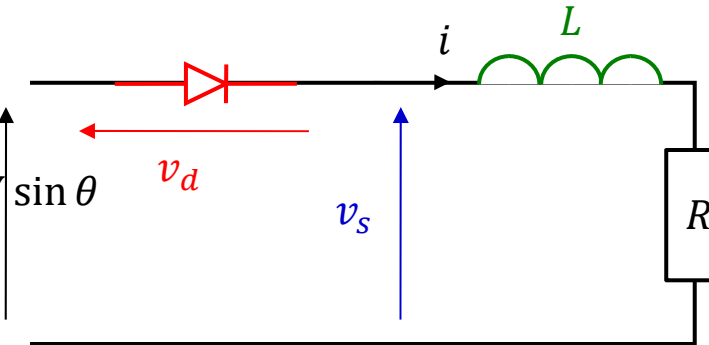
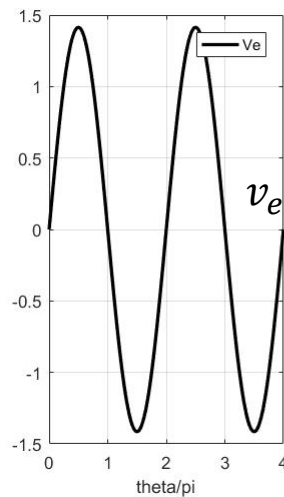
Le courant est toujours régi par l'équation différentielle

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

Dont la solution reste: $i_s(t) = V\sqrt{2} \left[\frac{R}{R^2 + L^2\omega^2} \sin \omega t - \frac{L\omega}{R^2 + L^2\omega^2} \cos \omega t \right] + K e^{-\frac{R}{L}t}$

I. Redressement simple alternance

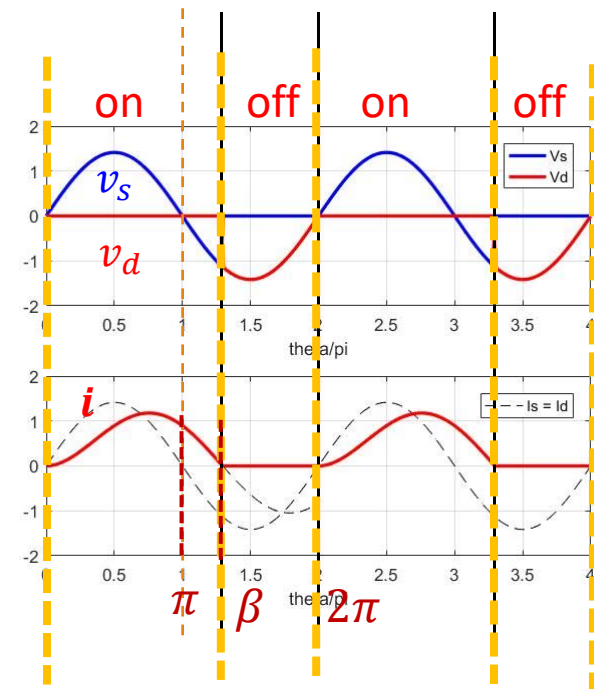
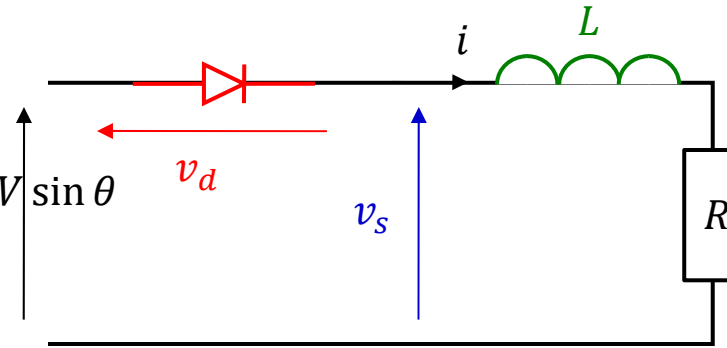
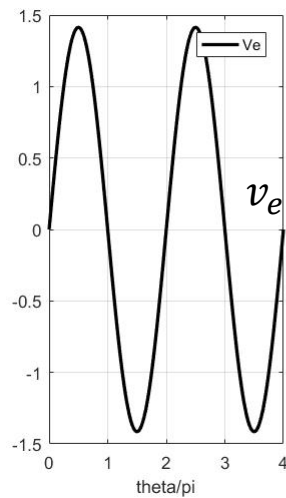
Circuit à diode sur charge R+L : *courant en retard sur la tension*



- Sur l'intervalle $[\beta, 2\pi[$: $v_e(\theta) < 0$
 - La diode est bloquée : $i(\theta) = 0$, donc $v_s(\theta) = 0$
 - $v_d(\theta) = v_e(\theta) < 0$

I. Redressement simple alternance

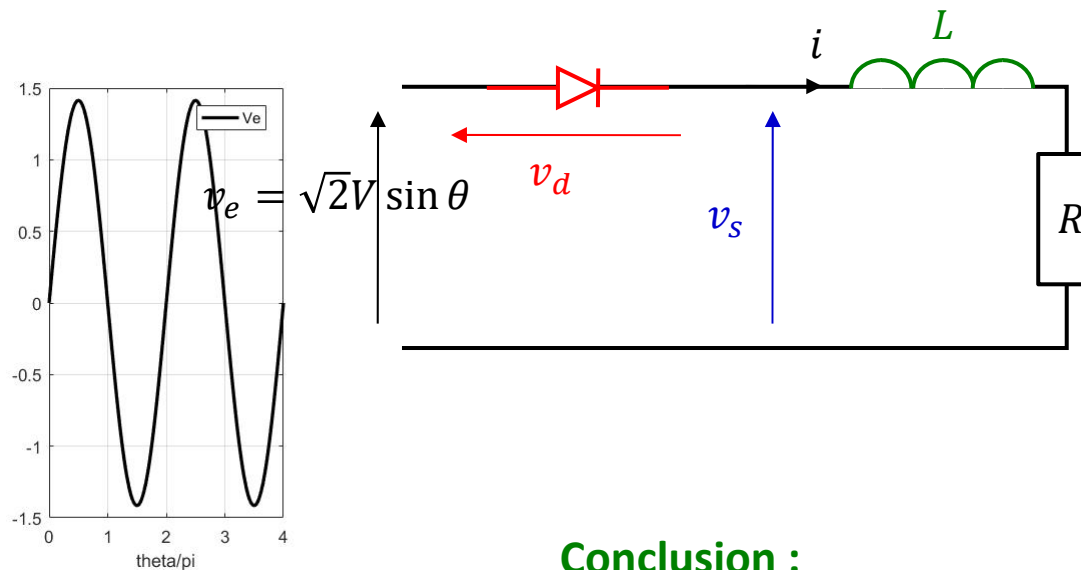
Circuit à diode sur charge R+L : *courant en retard sur la tension*



Fonctionnement
 2π -périodique

I. Redressement simple alternance

Circuit à diode sur charge R+L : *courant en retard sur la tension*



Conclusion :

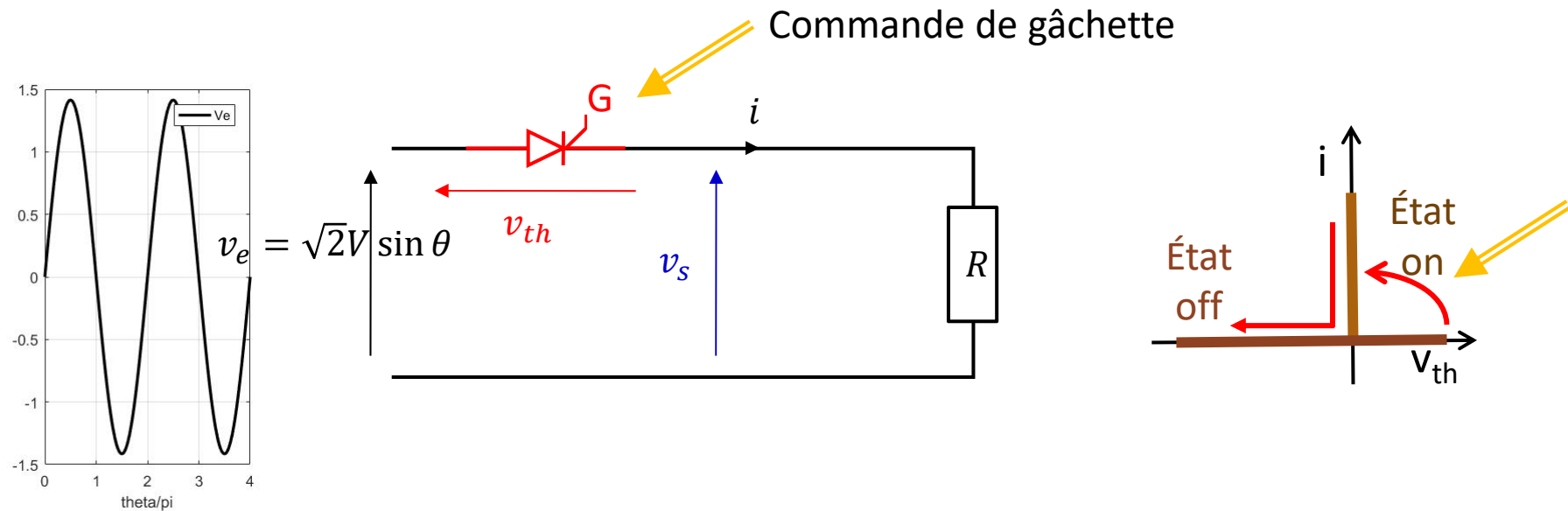
L'inductance modifie la forme du courant, et donc les instants où la diode se bloque et donc la tension de sortie

Voir également en TD5

Nous allons maintenant présenter le thyristor, composant qui permet de faire un peu de commande.

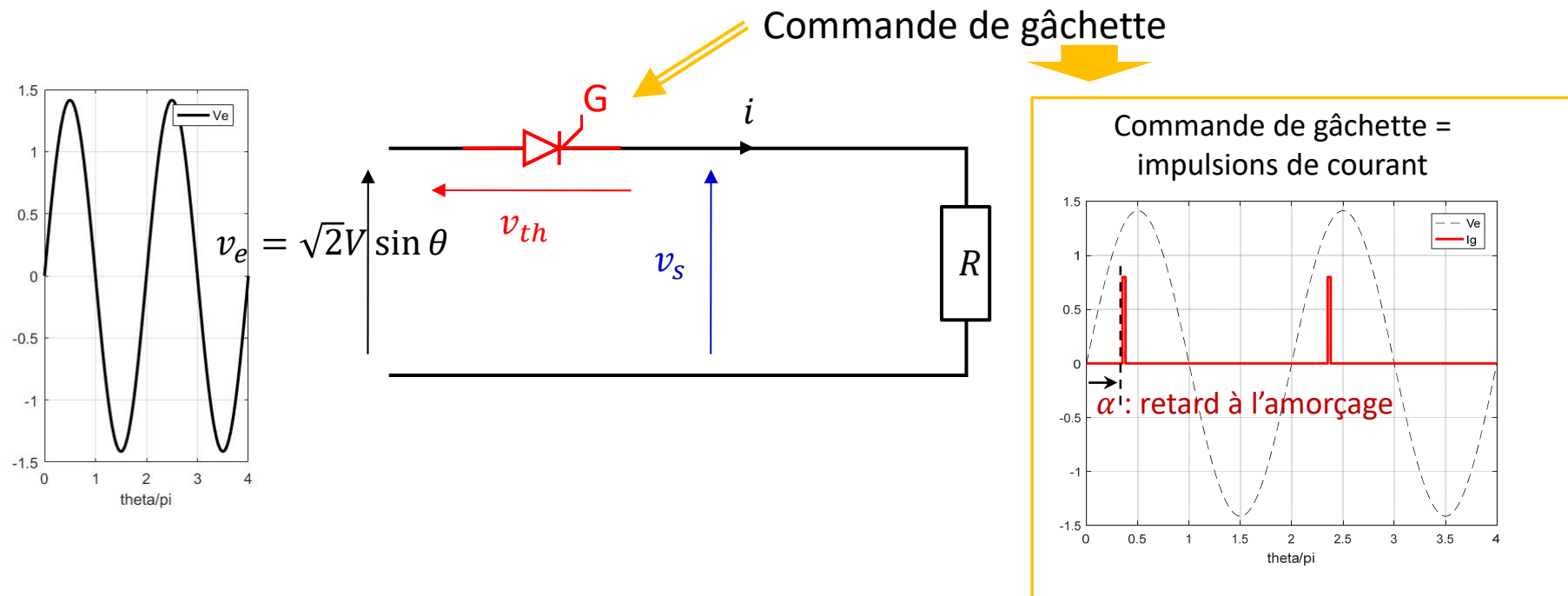
I. Redressement simple alternance

Circuit à **thyristor** sur charge R :



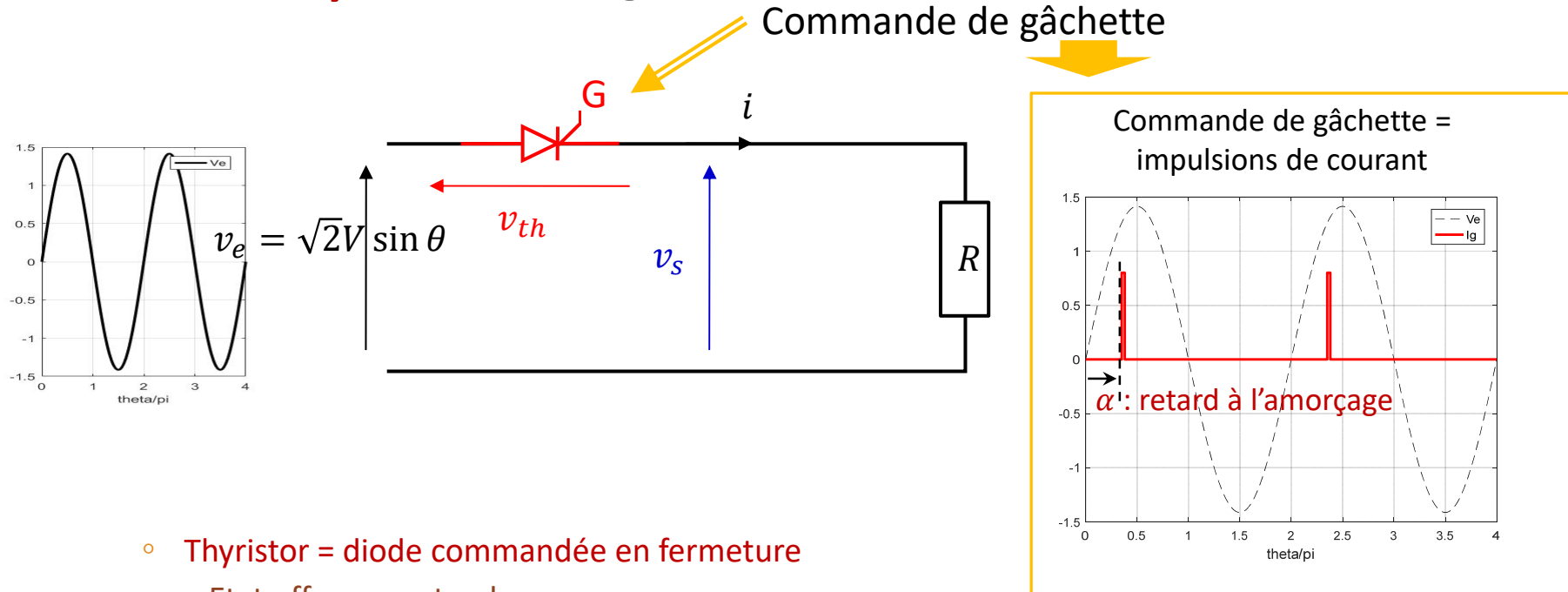
I. Redressement simple alternance

Circuit à **thyristor** sur charge R :



I. Redressement simple alternance

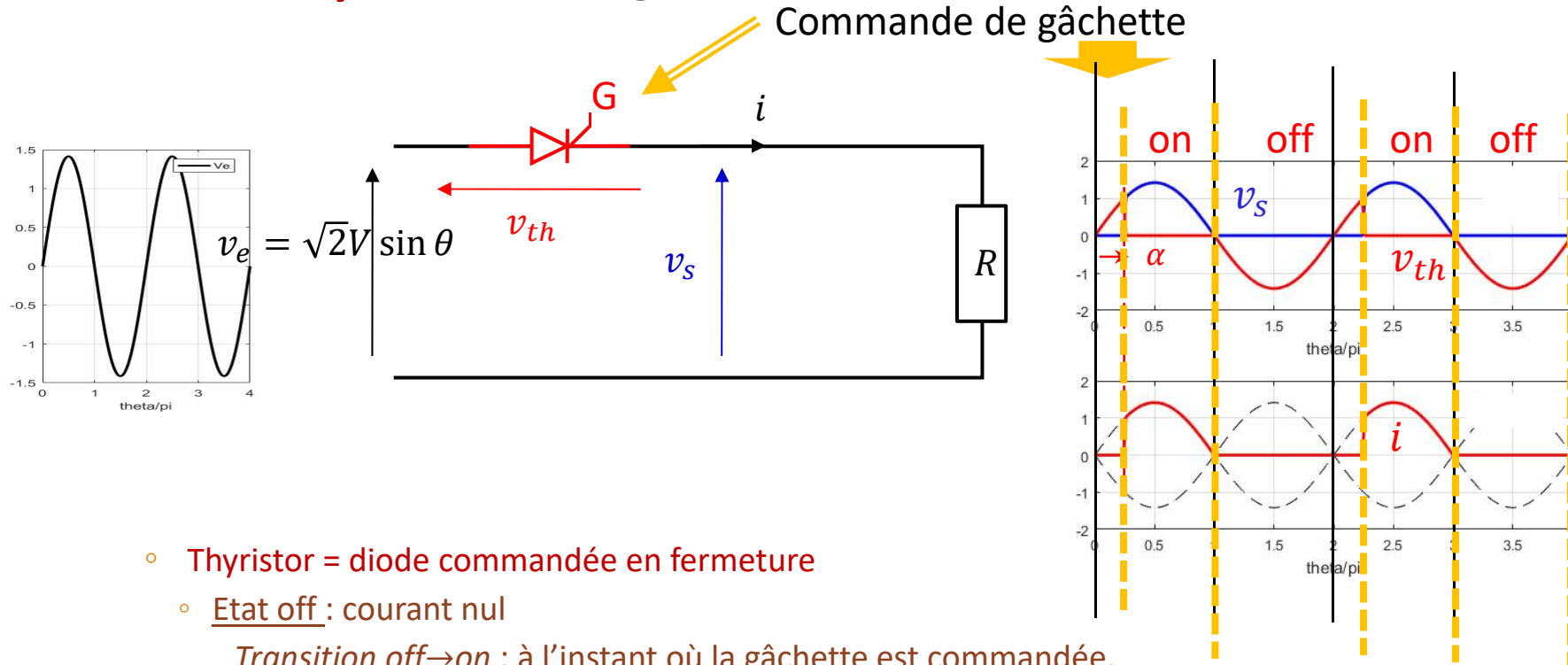
Circuit à **thyristor** sur charge R :



- Thyristor = diode commandée en fermeture
- Etat off : courant nul
Transition off → on : à l'instant où la gâchette est commandée, si $V_d > 0$ à cet instant
- Etat on : courant $i > 0$ et $V_d = 0$
Transition on → off : à l'instant où i s'annule

I. Redressement simple alternance

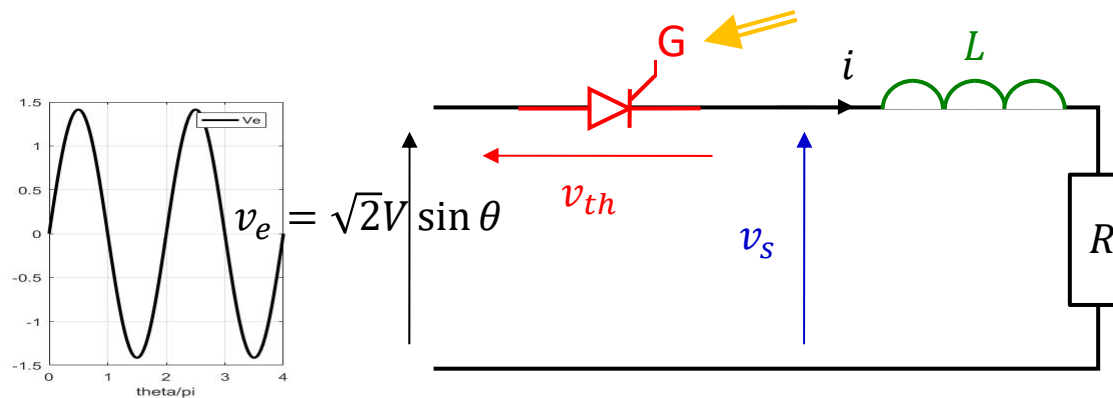
Circuit à **thyristor** sur charge R :



- Thyristor = diode commandée en fermeture
- Etat off : courant nul
Transition off → on : à l'instant où la gâchette est commandée, si $V_d > 0$ à cet instant
- Etat on : courant $i > 0$ et $V_d = 0$
Transition on → off : à l'instant où i s'annule

I. Redressement simple alternance

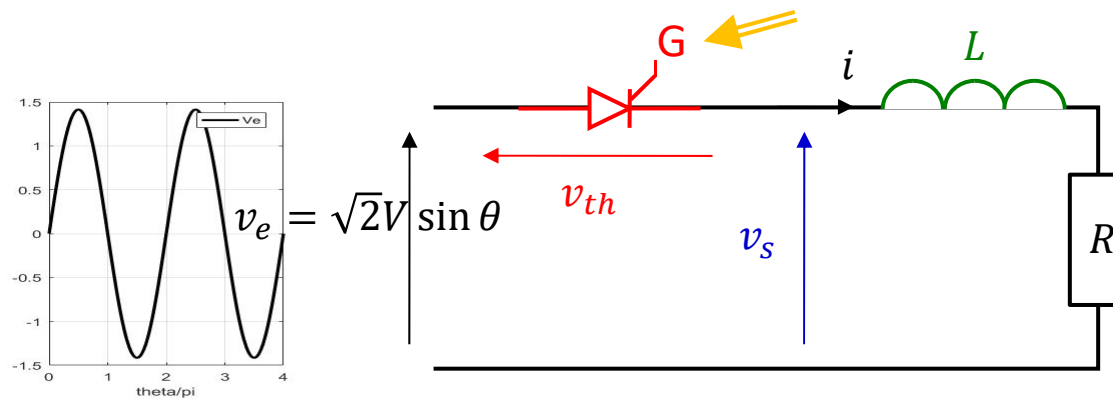
Circuit à thyristor sur charge R+L : *courant en retard sur la tension*



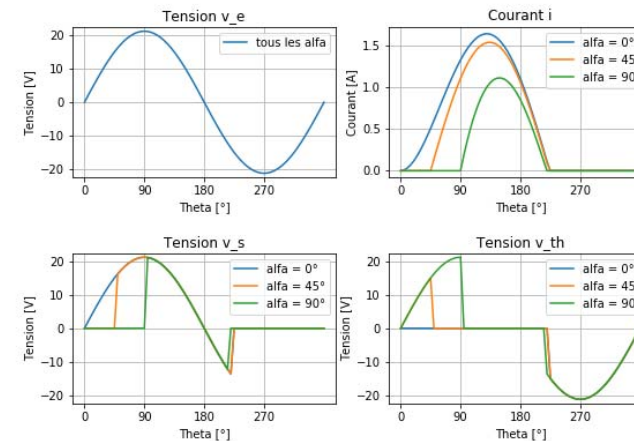
A votre avis :
quelle conséquence ce retard du courant a-t-il sur
les grandeurs de sortie ?

I. Redressement simple alternance

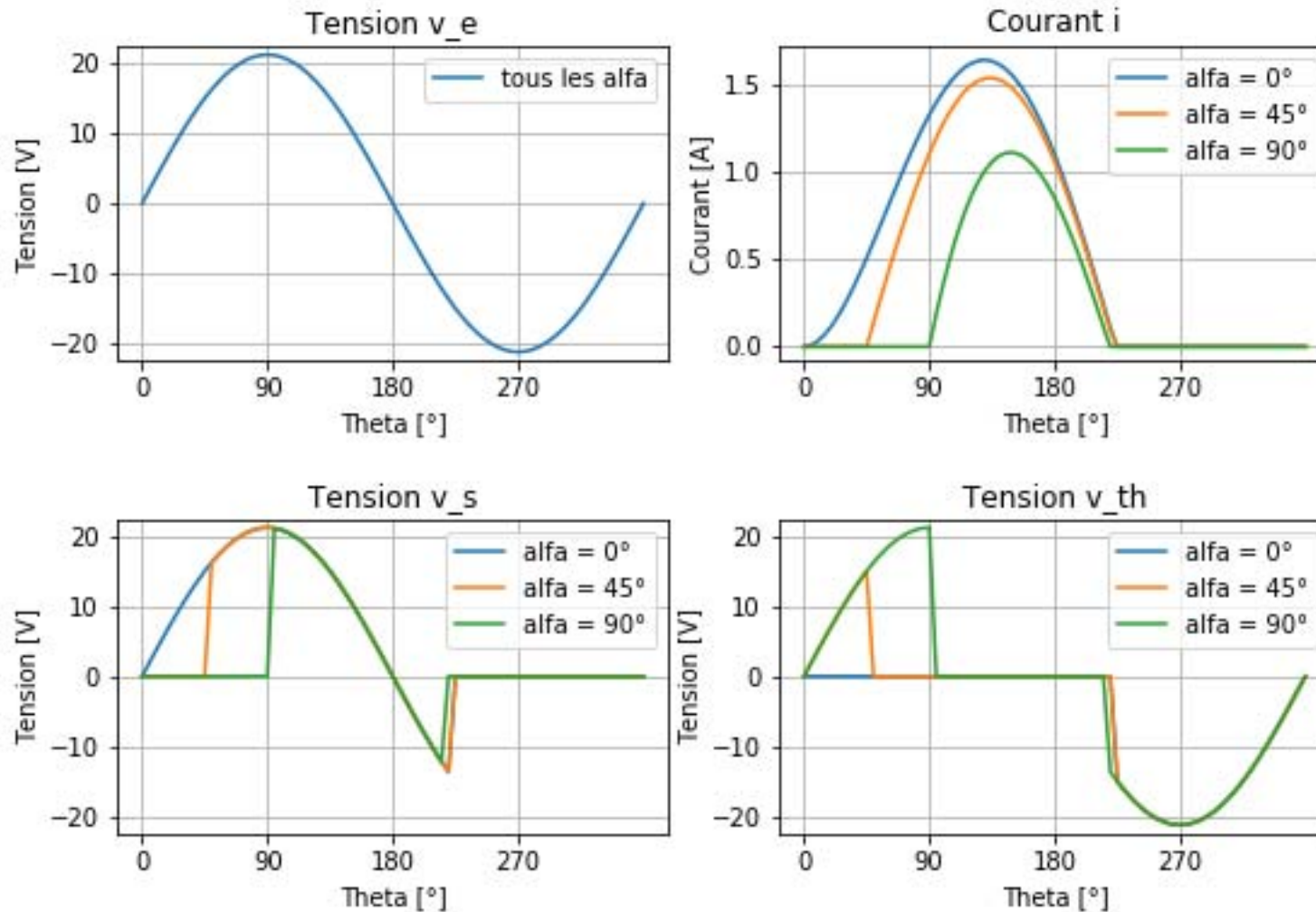
Circuit à thyristor sur charge R+L : *courant en retard sur la tension*



L'inductance modifie la forme du courant, et donc les instants où le thyristor se bloque, et donc la tension de sortie.



I. Redressement simple alternance



Nous avons vu :

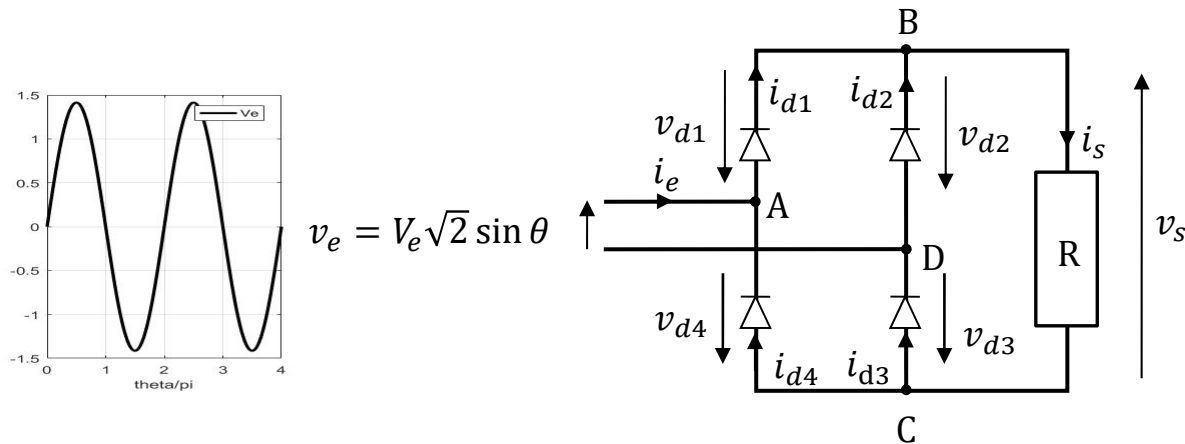
- le principe de base du redressement à diode
- les conséquences de la forme du courant
- le fonctionnement du thyristor

Prochaine étape :

- redressement **double alternance**
 - pont de diodes sur charge R, puis charge RL
 - redressement commandé grâce aux thyristors
-

II. Redressement double alternance

Pont de diodes sur charge R :



Il y a des *diodes en parallèle*, ce qui conduit à une autre manière de raisonner pour déterminer l'état des diodes.

Règles à appliquer pour l'analyse du circuit :

- D1/D2 en parallèle avec cathode commune :

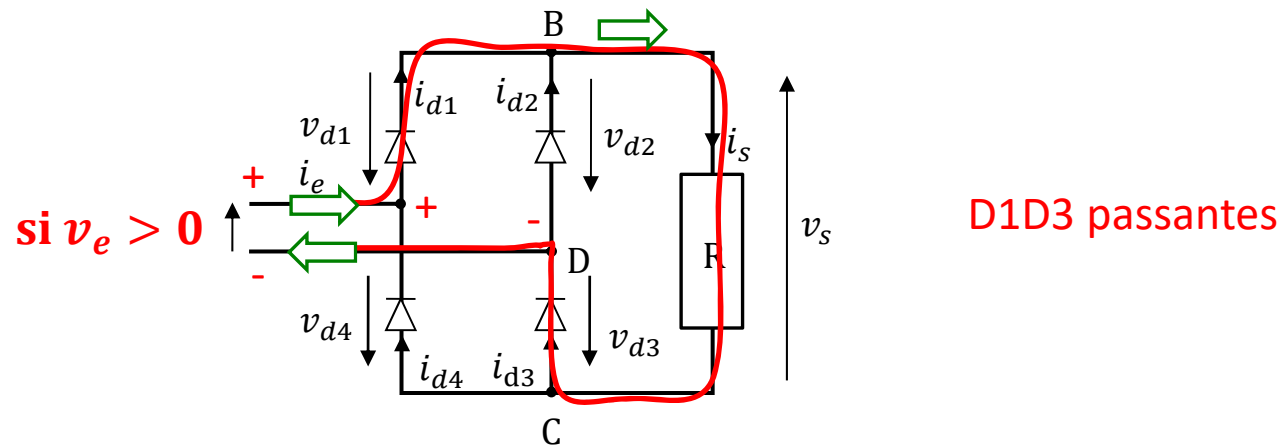
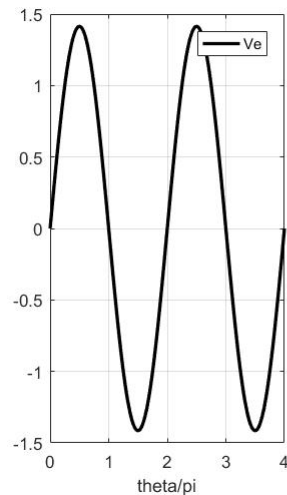
La diode passante est celle dont le potentiel d'anode est le plus élevé

- D3/D4 en parallèle avec anode commune :

diode passante = celle dont le potentiel de cathode est le plus bas

II. Redressement double alternance

Pont de diodes sur charge R :

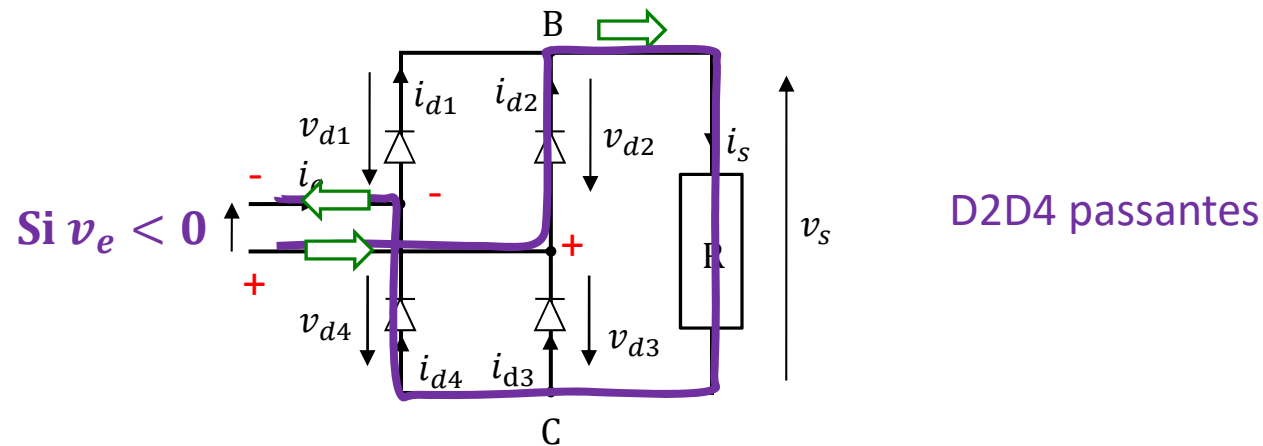
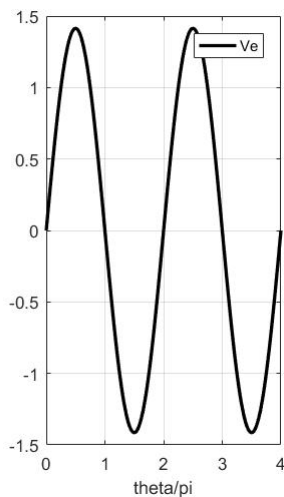


Règles pour l'analyse du circuit :


- Si $v_e > 0$**
- D1/D2 sont en parallèle avec cathode commune :
diode passante = D1
 - D3/D4 sont en parallèle avec anode commune :
diode passante = D3

II. Redressement double alternance

Pont de diodes sur charge R :

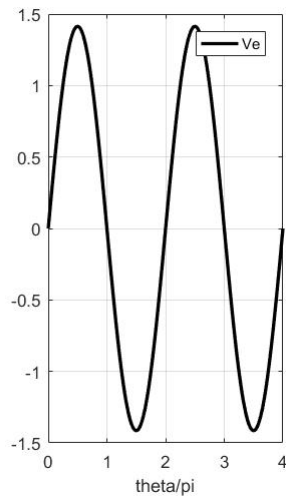


Règles pour l'analyse du circuit :

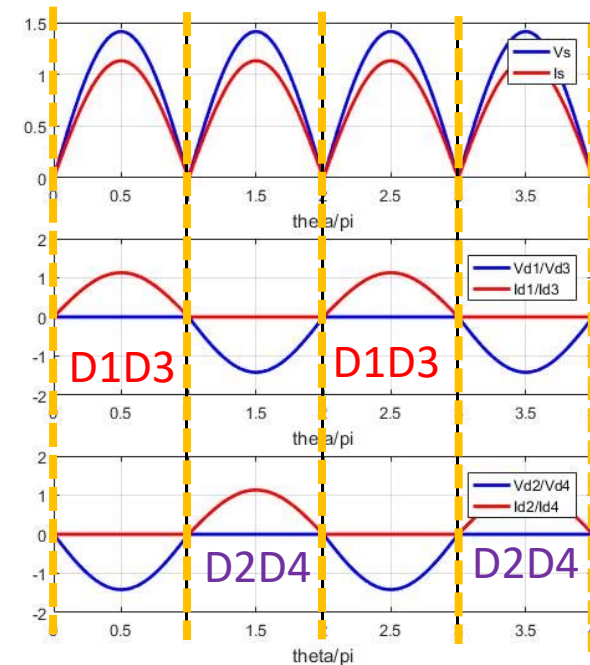
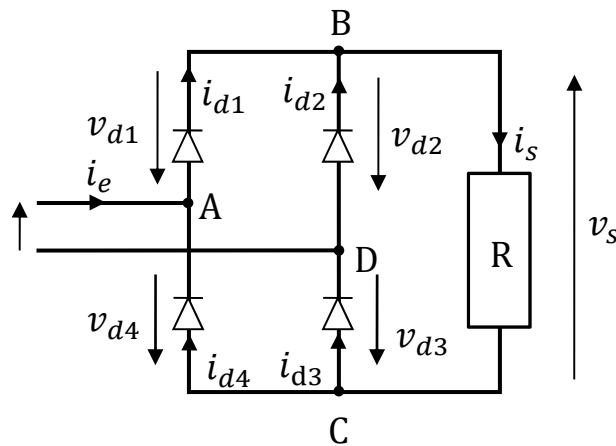
- Si $v_e < 0$** 
- D1/D2 sont en parallèle avec cathode commune :
diode passante = D2
 - D3/D4 sont en parallèle avec anode commune :
diode passante = D4

II. Redressement double alternance

Pont de diodes sur charge R :



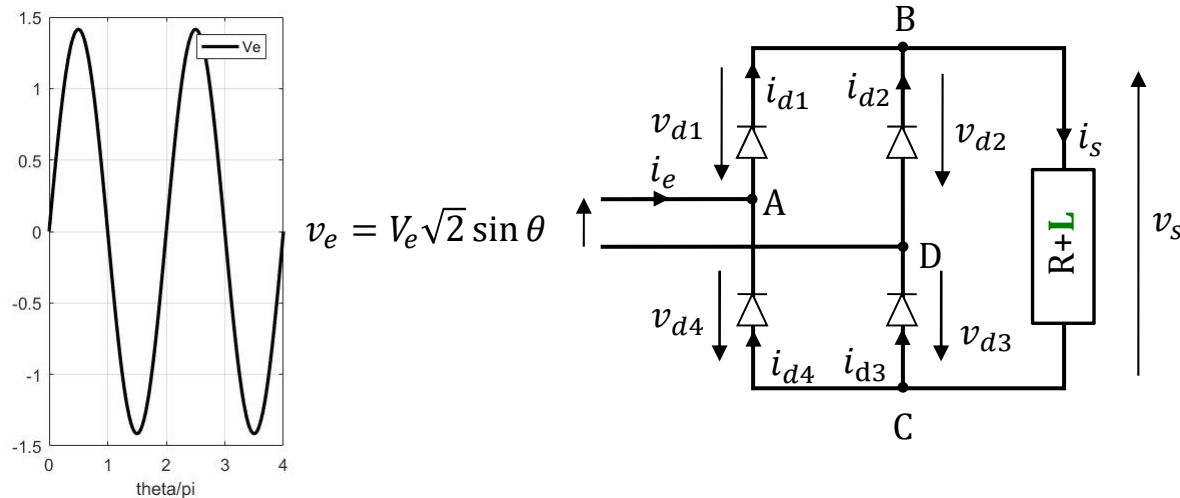
$$v_e = V_e \sqrt{2} \sin \theta$$



- $\langle v_s \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} V \sin \theta d\theta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V$
- $\Delta V = \sqrt{2} V$
- Taux d'ondulation : $\tau_v = \frac{\Delta V}{\langle v_s \rangle} = \frac{\pi}{2}$

II. Redressement double alternance

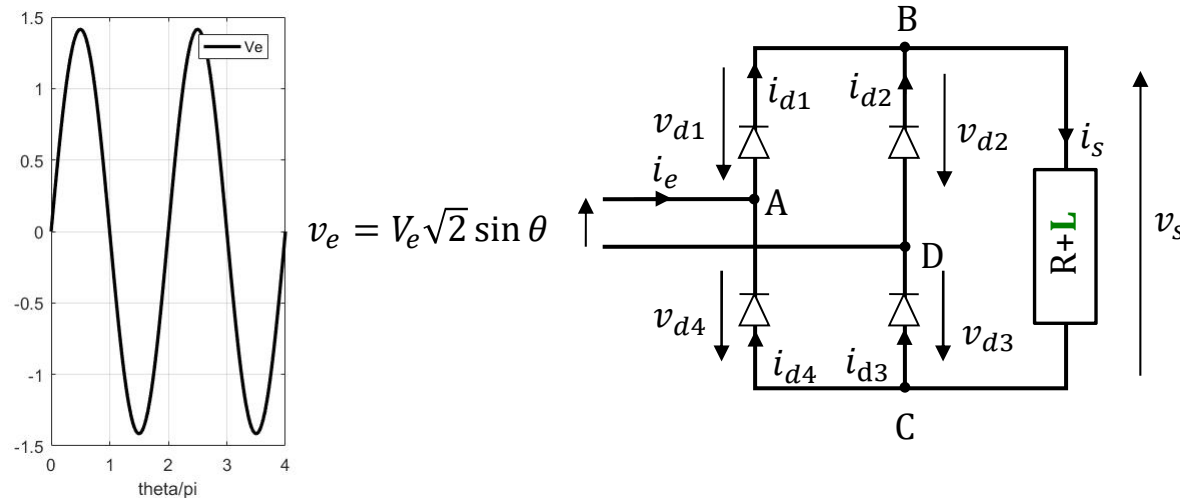
Pont de diodes sur charge $R+L$: le courant est en retard sur la tension



A votre avis :
quelle conséquence ce retard du courant a-t-il sur
les grandeurs de sortie ?

II. Redressement double alternance

Pont de diodes sur charge $R\mathbf{L}$: le courant est en retard sur la tension

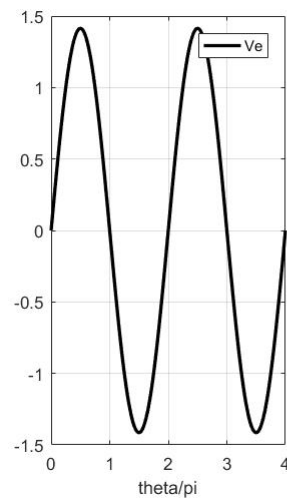


Dans le cas d'un pont de diodes, l'instant où les diodes changent d'état est déterminé par le signe de v_e . La forme de v_s n'est donc pas affectée par L .

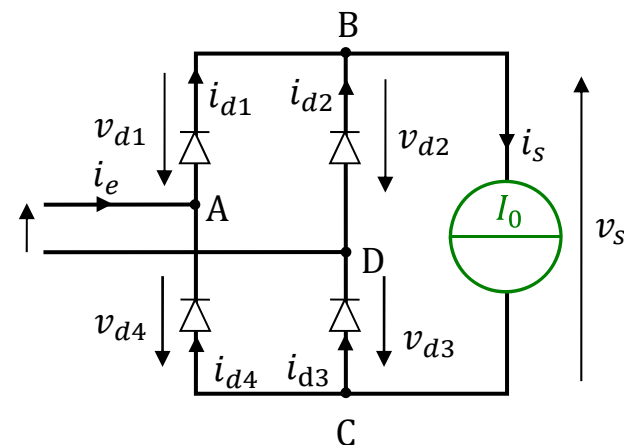
Le courant dans la charge passe alternativement par $D1/D3$ et $D2/D4$ sans jamais s'annuler et changer de sens.

II. Redressement double alternance

Pont de diodes sur **charge lissée (filtrage parfait)**:



$$v_e = V_e \sqrt{2} \sin \theta$$

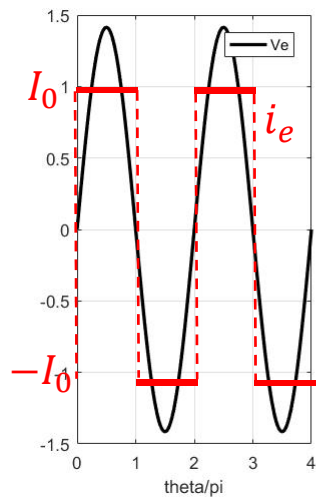


Charge = source de courant parfaite

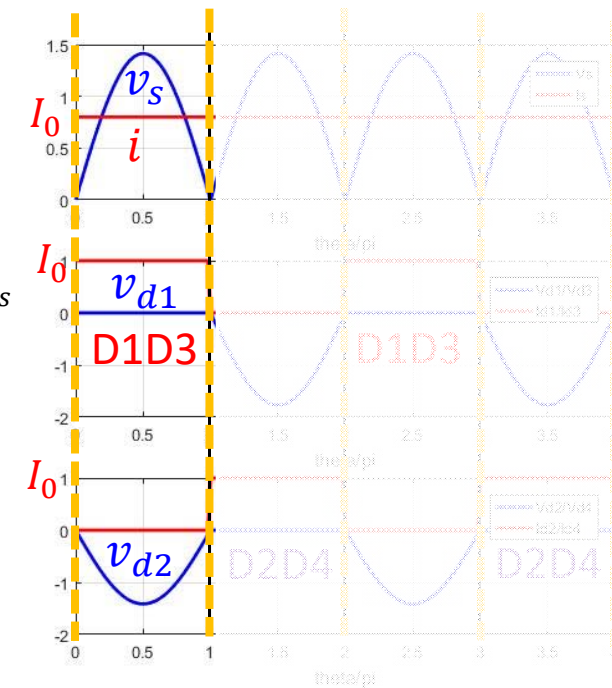
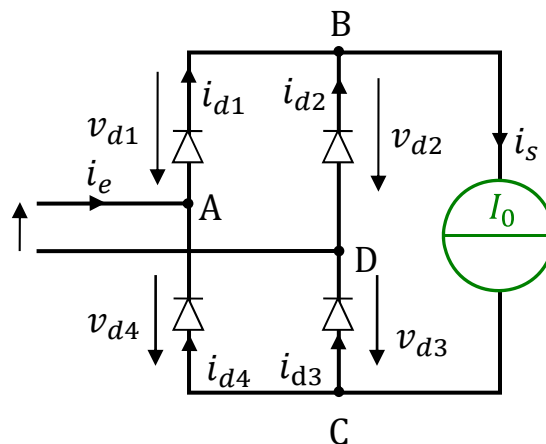
II. Redressement double alternance

Pont de diodes sur **charge lissée** :

Pour $0 < \theta < \pi$: $v_e(\theta) > 0$,
donc D1/D3 passantes et $v_e(\theta) = +v_e(\theta)$



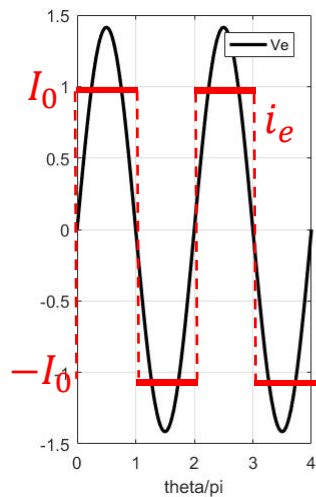
$$v_e = V_e \sqrt{2} \sin \theta$$



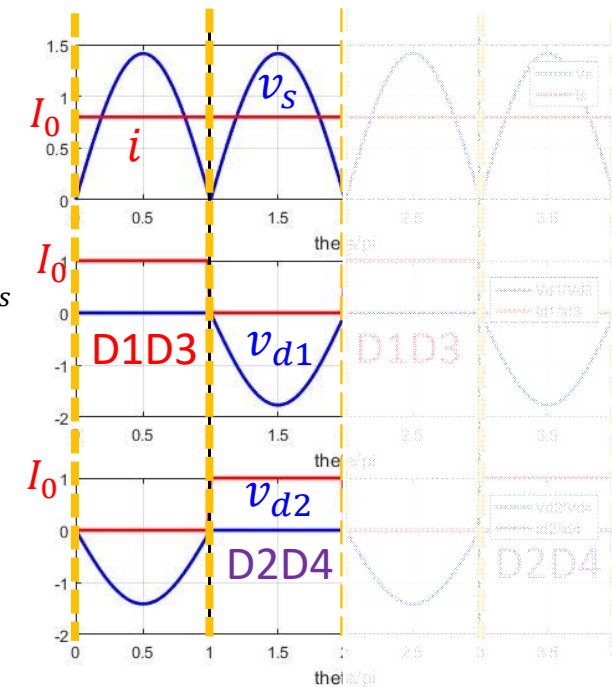
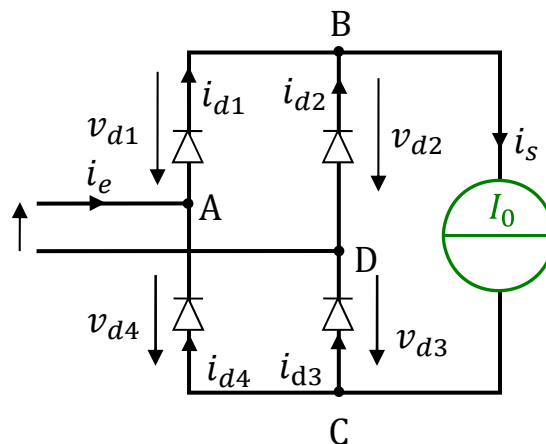
II. Redressement double alternance

Pont de diodes sur **charge lissée** :

Pour $\pi < \theta < 2\pi$: $v_e(\theta) < 0$,
donc D2/D4 passantes et $v_e(\theta) = -v_e(\theta)$

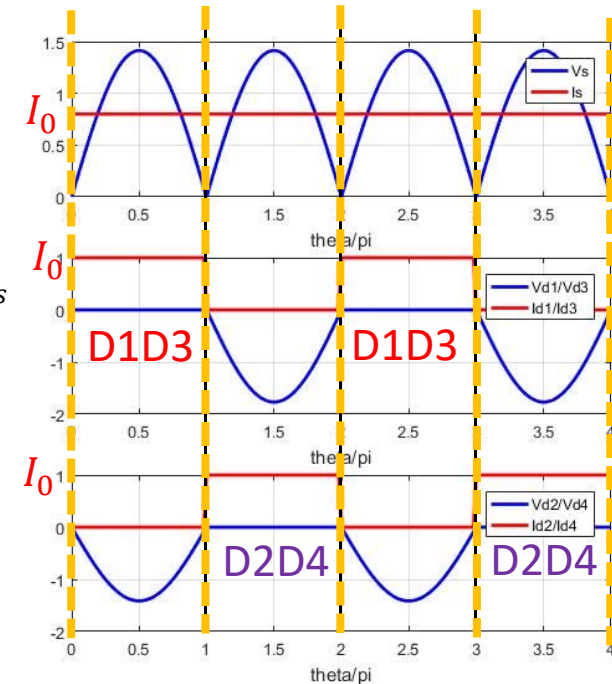
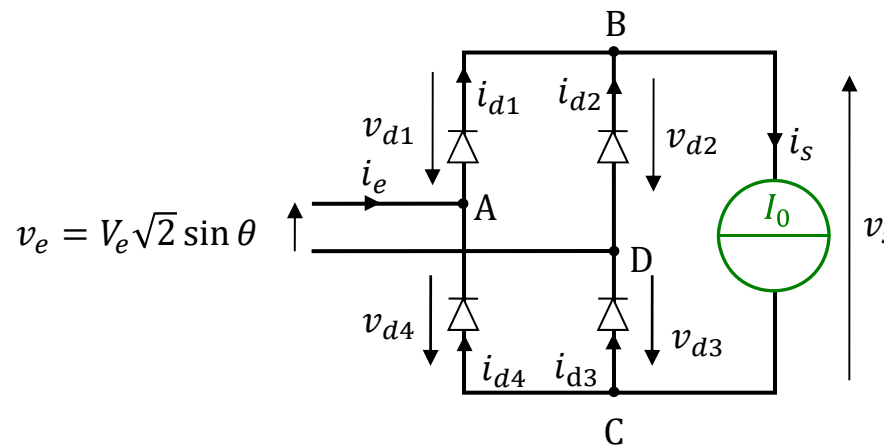
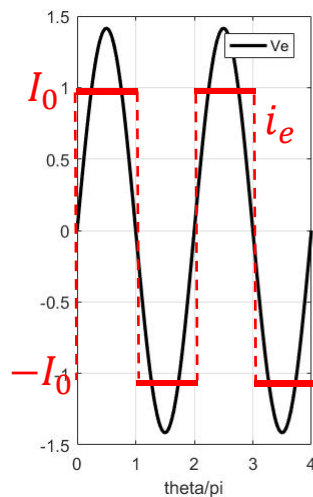


$$v_e = V_e \sqrt{2} \sin \theta$$



II. Redressement double alternance

Pont de diodes sur **charge lissée** :



Puissance reçue par la charge :

$$p(\theta) = I_0 \cdot v_s(\theta) \quad P = \langle p \rangle = I_0 \cdot \langle v_s \rangle$$

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V I_0$$

Puissance apparente, côté entrée:

$$S = I_{eff} \cdot V_{eff} = I_0 \cdot V$$

$$\text{Facteur de puissance : } FP = \frac{P}{S} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} = 0,90$$

LU3EE104 : Réseaux électriques et Electronique de puissance

Cours du 5/11/20

V. CONVERSION AC/DC, SUITE

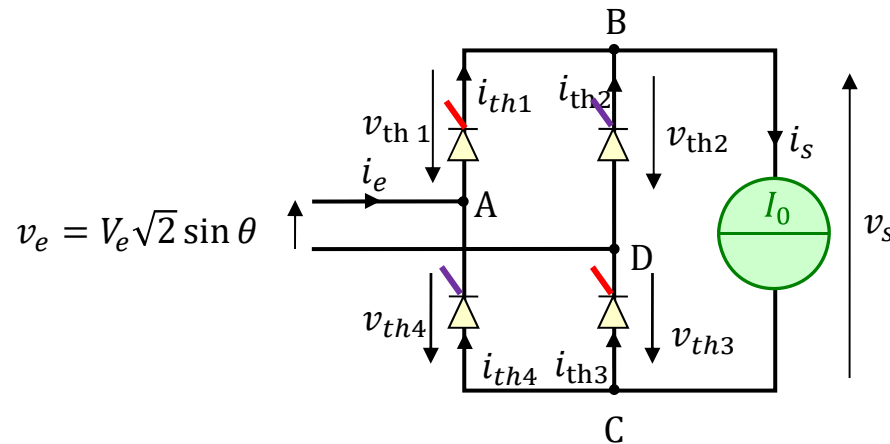
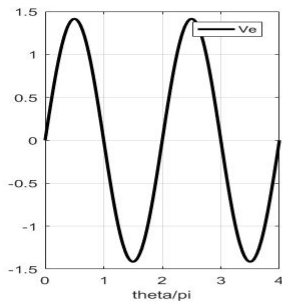
Ouvrage de référence :

Electronique de puissance, 2^e édition - Luc Lasne

Editions Dunod - ISBN 978-2-10-072135-1

II. Redressement double alternance

Pont de **thyristors** sur **charge lissée** :

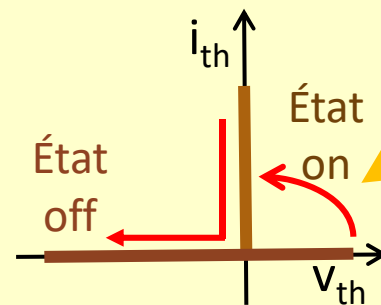


Charge lissée idéale :

- source de courant constant
- modélise une charge très inductive (moteur, par exemple)
- simplifie l'analyse, en première approche

Thyristor :

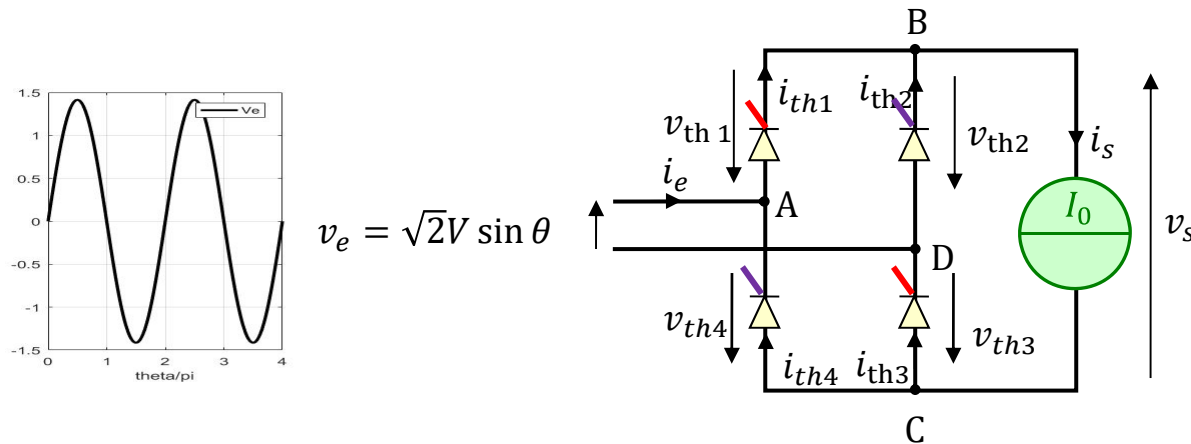
- diode commandée en fermeture



Angle de commande de Th1 et Th3 : α
Angle de commande de Th2 et Th4 : $\pi + \alpha$

II. Redressement double alternance

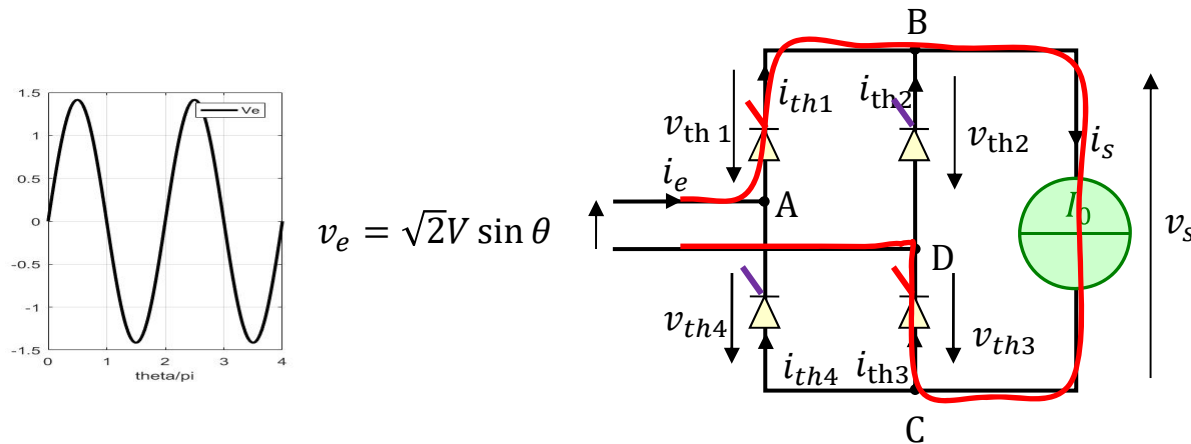
Pont de **thyristors** sur **charge lissée** :



- Th1 et Th2 sont en parallèle avec une cathode commune :
 - Th1 est amorcé si le signal de gâchette survient quand $v_A > v_D$, c'est-à-dire $v_e > 0$, donc pour $0 < \theta < \pi$
 - Th2 est amorcé si le signal de gâchette survient quand $v_D > v_A$, c'est-à-dire $v_e < 0$, donc pour $\pi < \theta < 2\pi$
- Th3 et Th4 sont en parallèle avec une anode commune :
 - Th3 est amorcé si le signal de gâchette survient quand $v_D < v_A$, c'est-à-dire $v_e > 0$, donc pour $0 < \theta < \pi$
 - Th4 est amorcé si le signal de gâchette survient quand $v_A < v_D$, c'est-à-dire $v_e < 0$, donc pour $\pi < \theta < 2\pi$

II. Redressement double alternance

Pont de **thyristors** sur **charge lissée** :



Angle de commande de Th1 et Th3 : α
 Angle de commande de Th2 et Th4 : $\pi + \alpha$

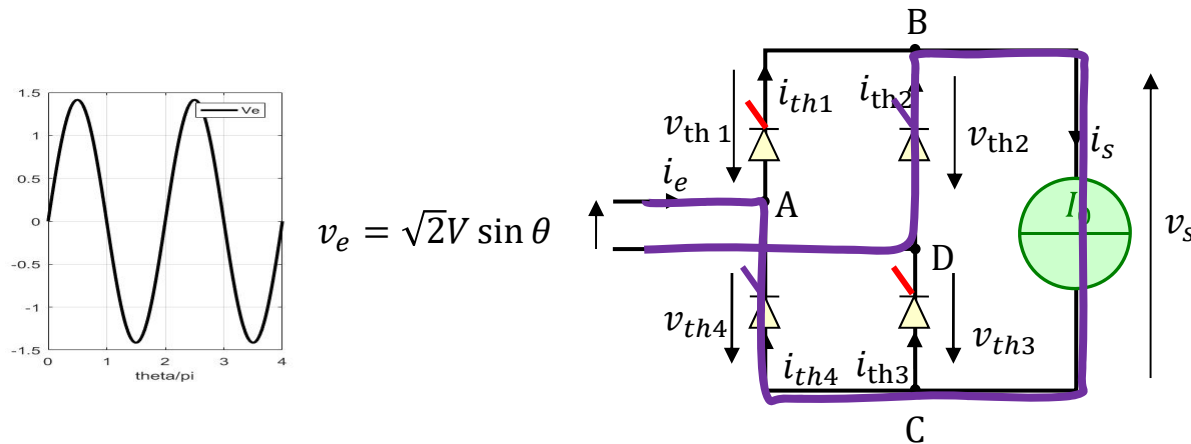
- Sur l'intervalle $\alpha < \theta < \pi + \alpha$:
 - Th1 et Th3 sont passants
 - Th2 et Th4 sont bloqués



- $v_s = v_e$
- $i_e = I_0$

II. Redressement double alternance

Pont de **thyristors** sur **charge lissée** :



Angle de commande de Th1 et Th3 : α
 Angle de commande de Th2 et Th4 : $\pi + \alpha$

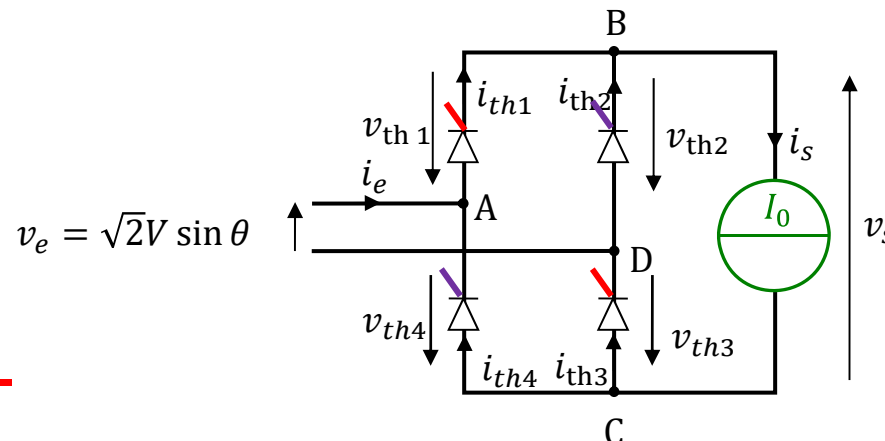
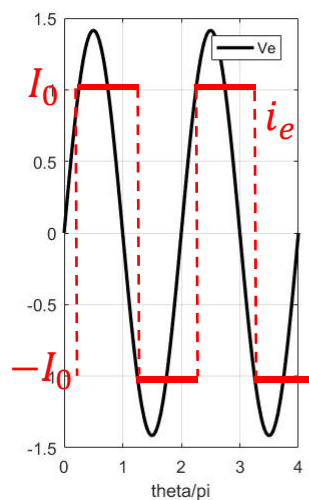
- Sur l'intervalle $\pi + \alpha < \theta < 2\pi + \alpha$:
 - Th2 et Th4 sont passants
 - Th1 et Th3 sont bloqués



- $v_s = -v_e$
- $i_e = -I_0$

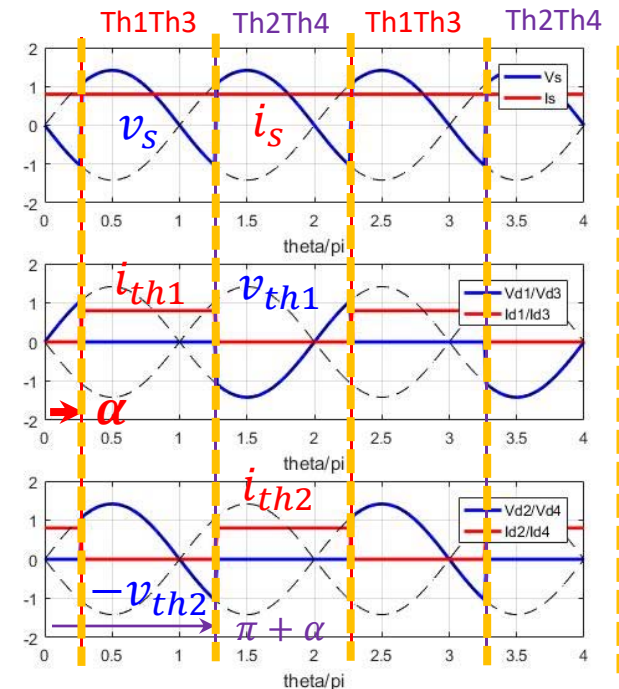
II. Redressement double alternance

Pont de thyristors sur **charge lissée** :



Angle de commande de Th1 et Th3 : α

Angle de commande de Th2 et Th4 : $\pi + \alpha$



v_s est π -périodique, avec

$$v_s(\theta) = V_e \sqrt{2} \sin \theta \text{ pour } \theta \in [\alpha, \pi + \alpha]$$

$$\langle v_s \rangle = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi + \alpha} \sqrt{2} V \sin \theta \, d\theta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \cos \alpha$$

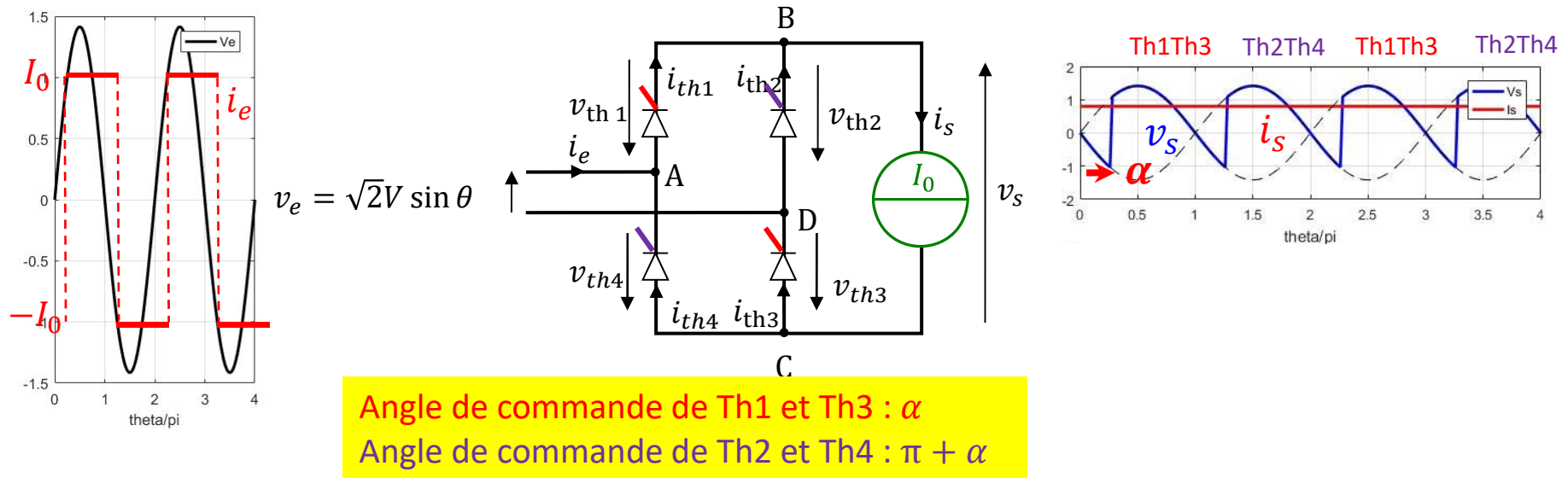
Puissance transférée :

$$p(\theta) = I_0 \cdot v_s(\theta) \quad P = \langle p \rangle = I_0 \cdot \langle v_s \rangle$$

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V I_0 \cos \alpha$$

II. Redressement double alternance

Pont de thyristors sur **charge lissée** :



Puissance active fournie par le réseau:

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_e I_0 \cos \alpha$$

Puissance apparente :

$$S = V_{eff} \cdot I_{eff} = V \cdot I_0$$

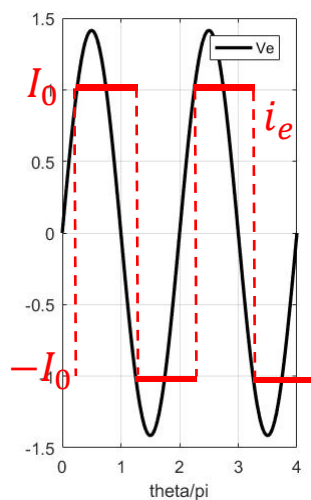
Facteur de puissance :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha = 0,9 \cos \alpha$$

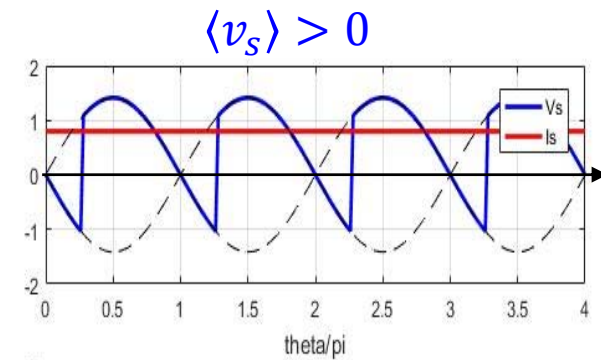
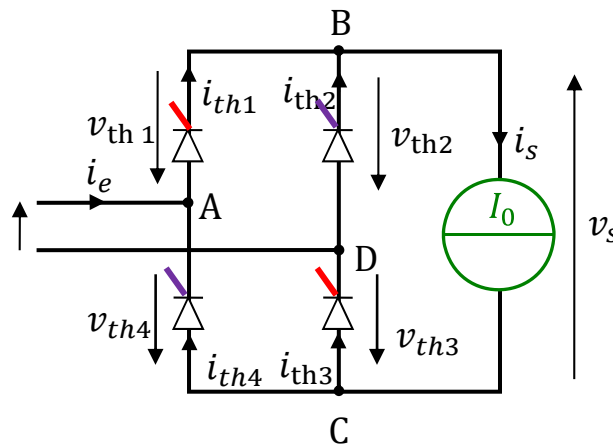
Quand α augmente, le FP se dégrade

II. Redressement double alternance

Pont de thyristors sur **charge lissée** :



$$v_e = \sqrt{2}V \sin \theta$$

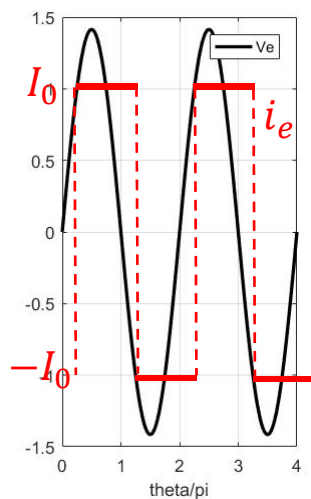


$$\text{Si } 0 \leq \alpha < \frac{\pi}{2} \quad P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V I_0 \cos \alpha > 0$$

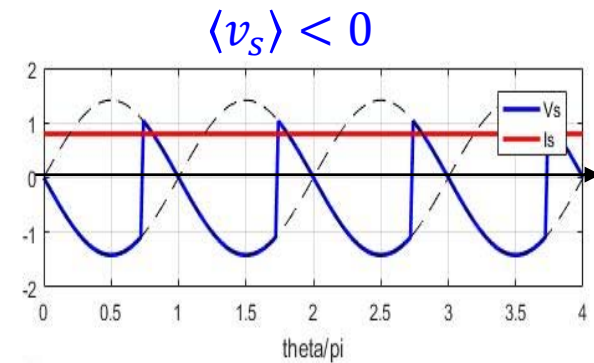
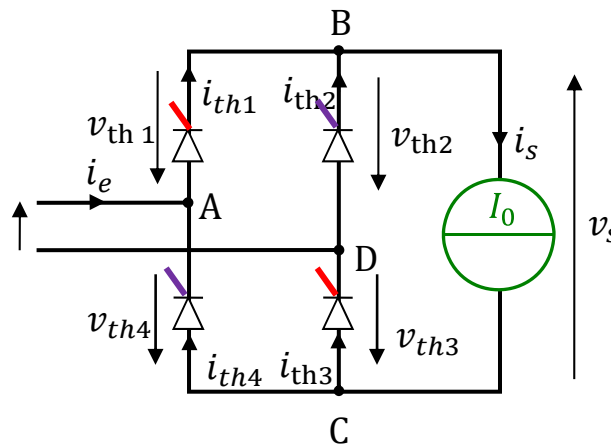
$$P > 0$$

II. Redressement double alternance

Pont de thyristors sur **charge lissée** :



$$v_e = \sqrt{2}V \sin \theta$$



$$\text{Si } \frac{\pi}{2} \leq \alpha < \pi \quad P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V I_0 \cos \alpha < 0$$

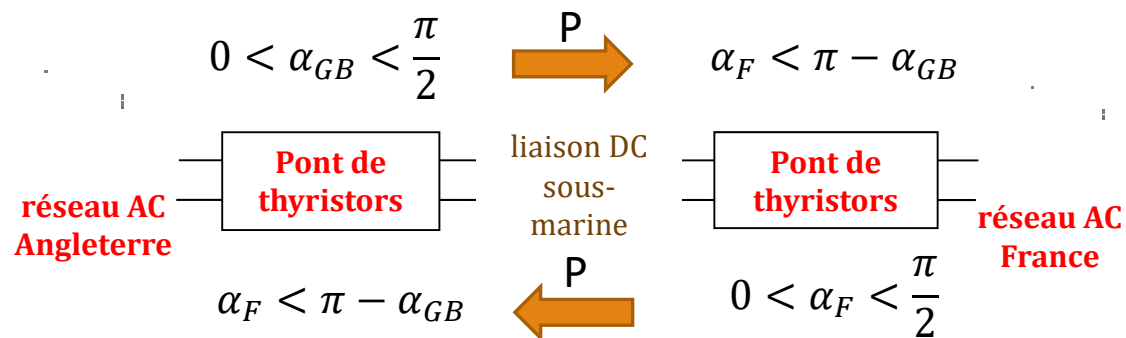
$$P < 0$$

Réversibilité en tension

Interconnexion France-Angleterre IFA 2000

Réseau AC
anglais

Interconnexion bi-directionnelle
2 GW, mise en service en 1986

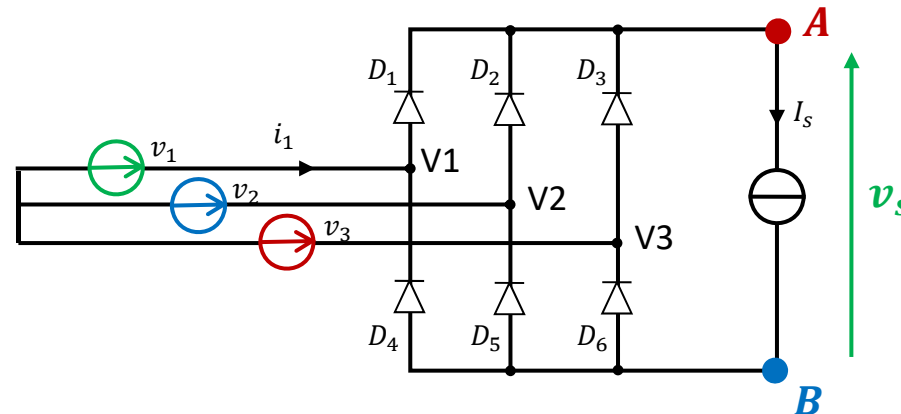


Réseau AC
français

Redresseur triphasé non commandé

Schéma de principe :

$$\begin{cases} v_1(\theta) = V_{max} \sin(\theta) \\ v_2(\theta) = V_{max} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_3(\theta) = V_{max} \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases}$$



D1, D2, D3 sont en parallèle, avec cathodes communes

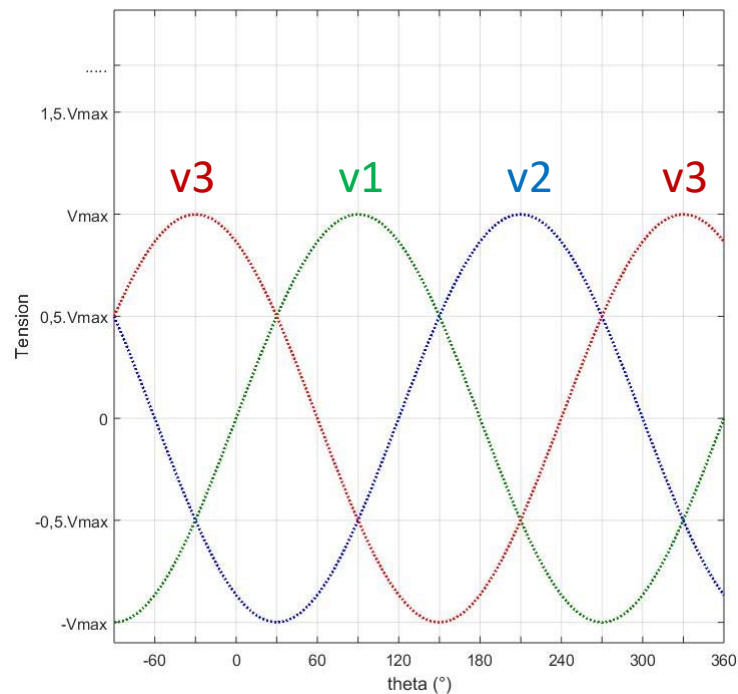
- la diode passante est celle dont le potentiel d'anode est le plus élevé
- Donc $v_A = \max(v_1, v_2, v_3)$

D4, D5, D6 sont en parallèle, avec anodes communes

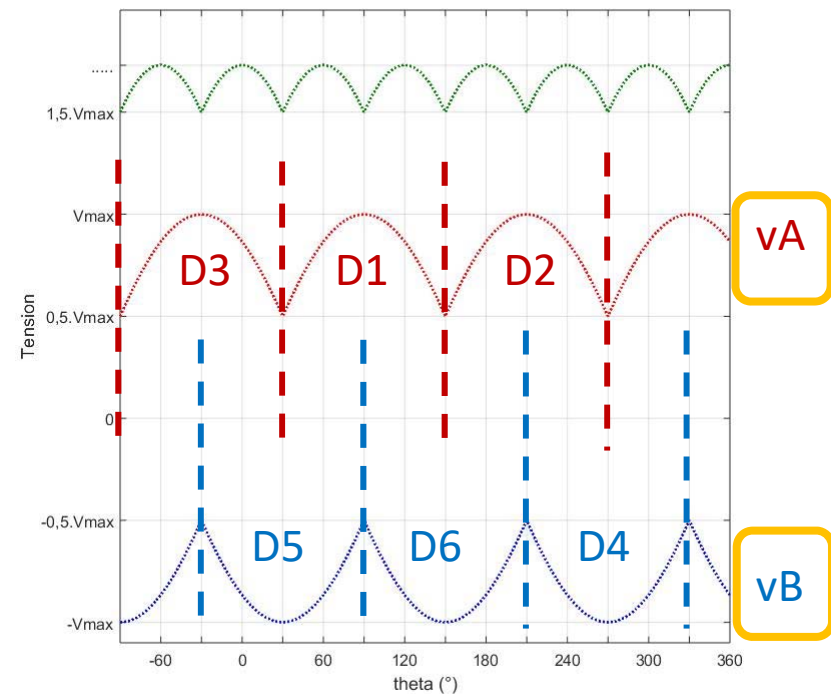
- la diode passante est celle dont le potentiel de cathode est le plus bas
- Donc $v_b = \min(v_1, v_2, v_3)$

Redresseur triphasé non commandé

Tensions en entrée :

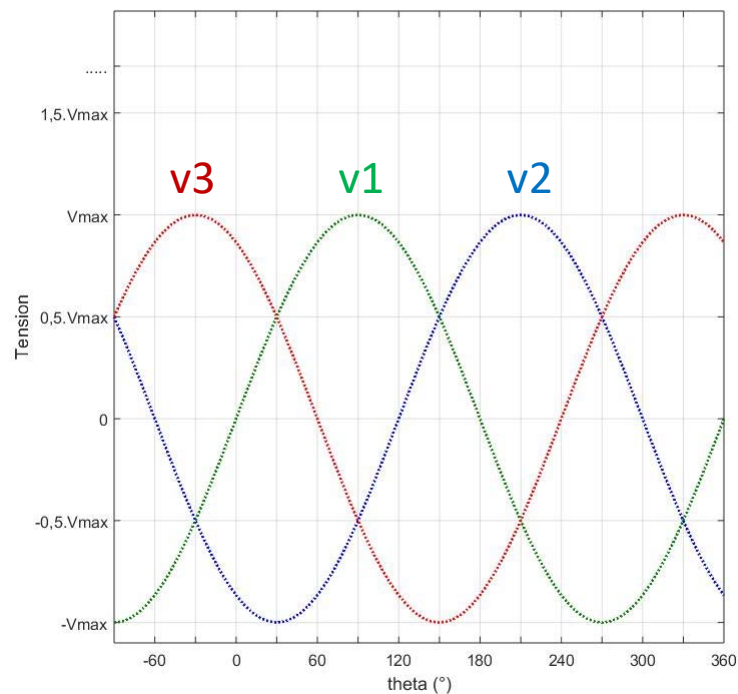


Tensions en sortie

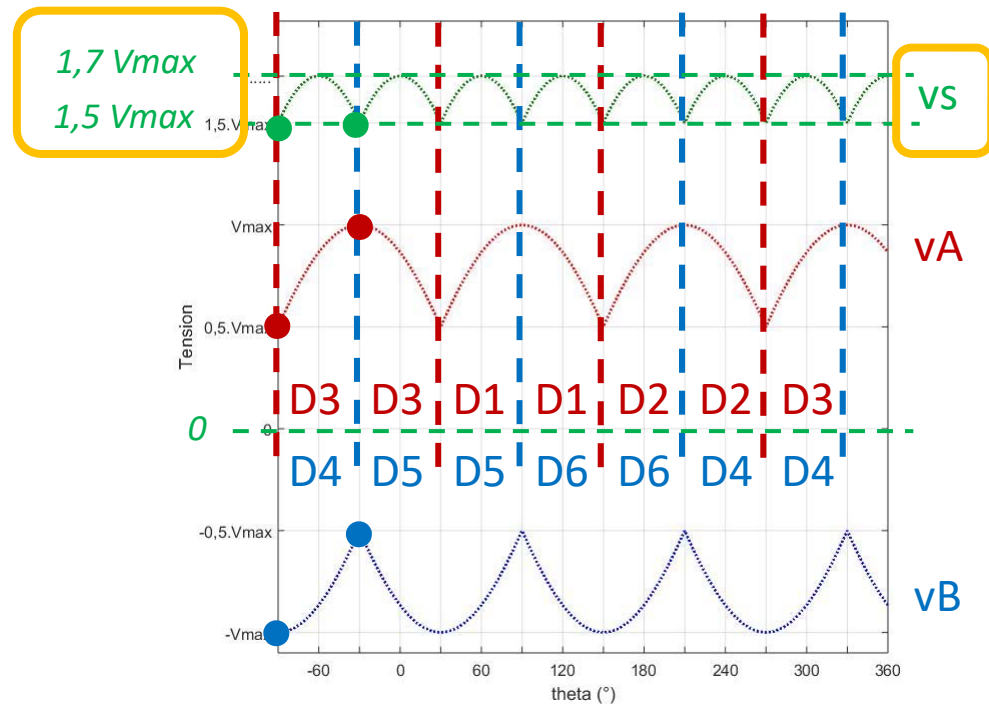


Redresseur triphasé non commandé

Tensions en entrée :



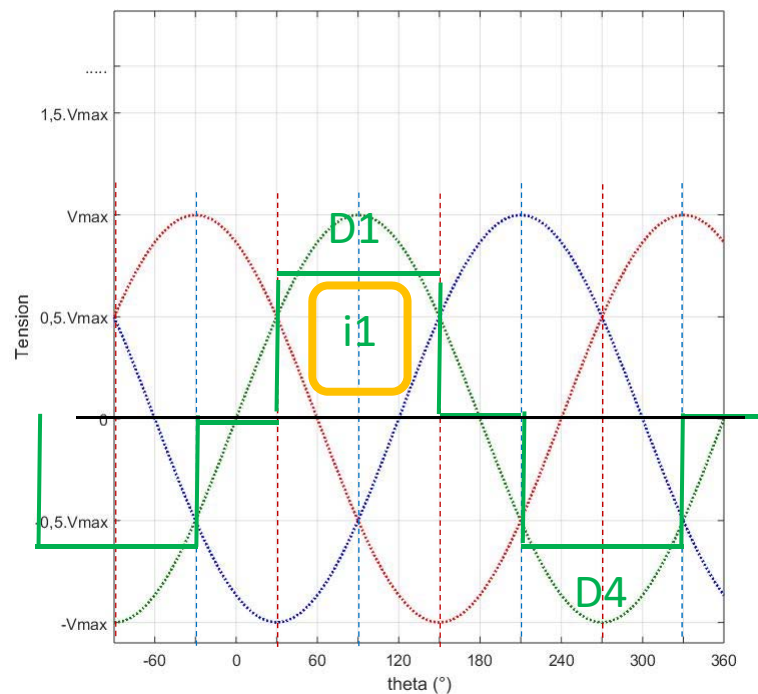
Tensions en sortie



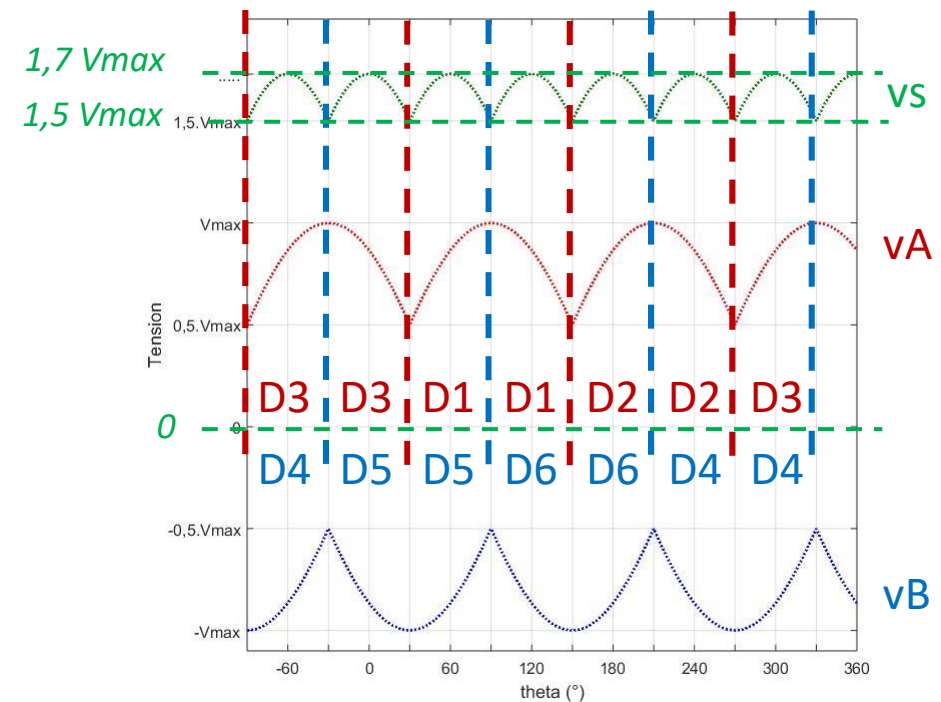
Période : $\frac{\pi}{3}$ $\tau_{vs} = 0,14$

Redresseur triphasé non commandé

Courants en entrée :

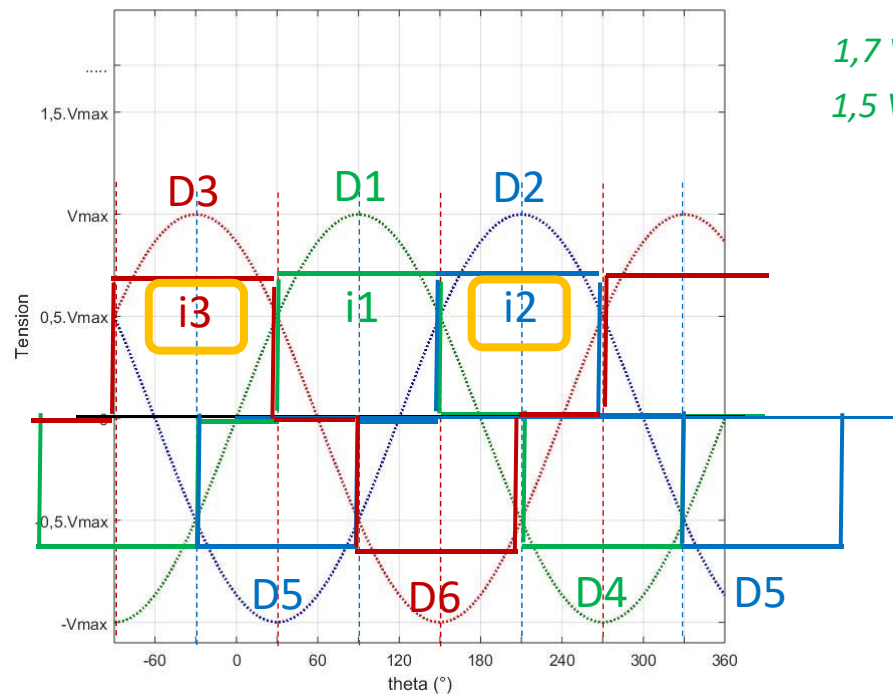


Tensions en sortie



Redresseur triphasé non commandé

Courants en entrée :



Tensions en sortie

