

Transformation de l'énergie électrique

S. Dufour

2A Energie - ENRS8AB

7 mai 2026



Objectif de la leçon

L'électricité se rencontre essentiellement sous trois formes :

- ➡ le courant continu (Direct Current) DC ;
- ➡ le courant alternatif (Alternative Current) AC de fréquence celle du réseau électrique (50 Hz) ;
- ➡ le courant alternatif de fréquence f différente de 50 Hz.

**L'objectif de la séance est la description
des dispositifs de conversion électrique :**

depuis vers	DC (courant continu)	AC 50 Hz (courant alternatif)
DC	hacheur	redresseur ¹
50Hz AC	onduleur	transformateur ²
$f \neq 50\text{Hz}$ AC	onduleur	redresseur+onduleur

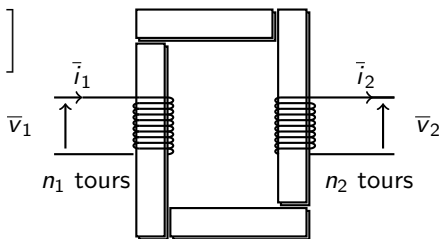
1. Un hacheur peut être mis en cascade du redresseur pour contrôler la tension DC de sortie

2. En plus des transformateurs classiques (à noyau de fer), des transformateurs à semi-conducteurs (SST=Solid State Transformer) commencent à apparaître. Le gradateur est également utilisé.

Transformateur monophasé

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & M \\ M & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ -i_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \bar{v}_1 = j\omega\bar{\varphi}_1 \\ \bar{v}_2 = j\omega\bar{\varphi}_2 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \bar{i}_1 = \frac{\bar{v}_1}{jL_1\omega} + \frac{M}{L_1}\bar{i}_2 \\ \bar{v}_2 = -jL_2\omega\bar{i}_2 + jM\omega\bar{i}_1 \end{cases} \rightsquigarrow \begin{cases} \bar{i}_1 = \frac{\bar{v}_1}{jL_1\omega} + \frac{M}{L_1}\bar{i}_2 \\ \bar{v}_2 = \frac{M}{L_1}\bar{v}_1 - jL_2\omega\left(1 - \frac{M^2}{L_1L_2}\right)\bar{i}_2 \end{cases}$$

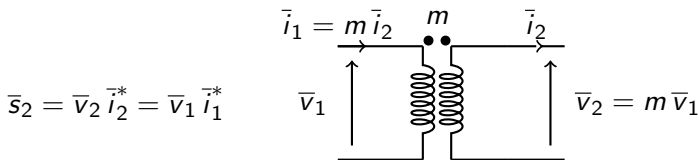
Rapport de transformation : $m = \frac{M}{L_1} \simeq \frac{n_1 n_2}{n_1^2} = \frac{n_2}{n_1}$

Réactance de fuite : $\lambda\omega = \sigma L_2\omega$

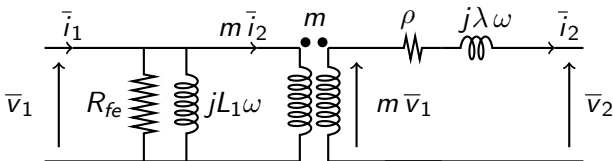
Coefficient de couplage : $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$ (compris entre 0 et 1)

Transformateur monophasé

Transformateur idéal : *conservation de la puissance apparente*

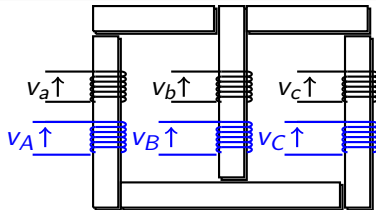


Transformateur non-idéal



R_{fe} : résistance modélisant les pertes fer, $L_1\omega$: réactance de magnétisation
 $\lambda\omega$ la somme de la réactance de fuite, ρ résistance modélisant les pertes Joule

Transformateur triphasé



rapport de transformation par phase

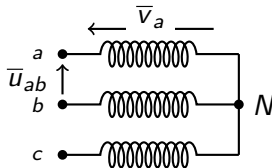
$$m_0 = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\bar{v}_a}{\bar{v}_A} = \frac{\bar{v}_b}{\bar{v}_B} = \frac{\bar{v}_c}{\bar{v}_C}$$

rapport de transformation

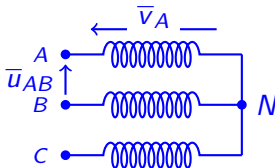
$$\bar{m} = \frac{\bar{u}_{ab}}{\bar{u}_{AB}}$$

système triphasé direct : $\bar{v}_A = \bar{v}_d$; $\bar{v}_B = a^2 \bar{v}_d$; $\bar{v}_C = a \bar{v}_d$;

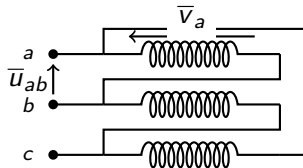
Symbole
y



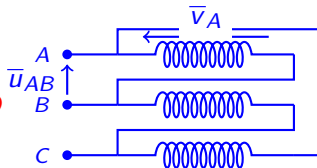
Y



d



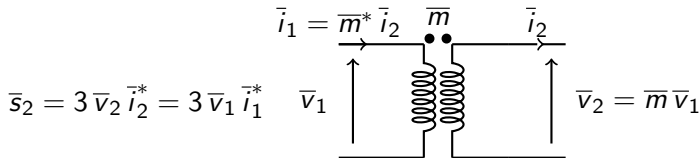
D



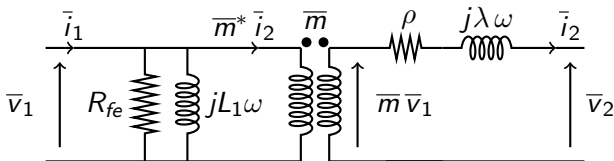
Transformateur triphasé

Transformateur idéal : *conservation de la puissance apparente*

schéma monophasé équivalent (phase-neutre)



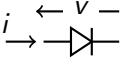
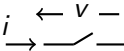
Transformateur non-idéal



R_{fe} : résistance modélisant les pertes fer, $L_1 \omega$: réactance de magnétisation

$\lambda \omega$ la somme de la réactance de fuite, ρ résistance modélisant les pertes Joule

Les composants idéaux sont :

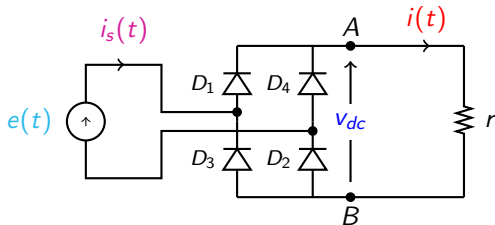
nom du dispositif	symbole	relation
diode		$v \ i = 0 \text{ et } (i \geq 0 \text{ ou } v \leq 0)$
interrupteur k		$k \text{ ouvert } i = 0, k \text{ fermé } v = 0$

La diode est un interrupteur unidirectionnel (le courant ne peut passer que dans un seul sens) et non-commandé (c'est le circuit extérieur à elle qui détermine son état).

L'interrupteur n'est pas un composant mais plutôt une fonction qui peut être réalisée principalement au moyen d'un composant commandable et unidirectionnel : le transistor (la commande se fait par application d'une tension sur sa base, une de ses trois bornes). Pour réaliser avec eux des interrupteurs bidirectionnels il est nécessaire de réaliser des montages comportant plusieurs de ces composants, regroupés sous formes de modules de puissance.

Redressement : conversion AC/DC

Charge résistive : $v_{dc}(t) = r i(t)$



$v_A = \max(e(t), 0)$: diode D_1 ou D_4 conduit

$v_B = \min(e(t), 0)$: diode D_2 ou D_3 conduit

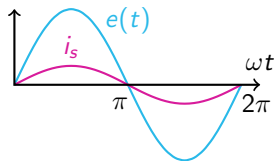
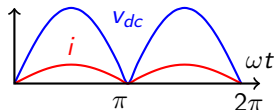
$$v_{dc} = v_A - v_B = \max(e(t), -e(t))$$

$$e(t) = \sqrt{2} E \sin(\omega t) \quad \leadsto \quad \langle v_{dc} \rangle = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E$$

$$v_{dc}(t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cos(2n\omega t)}{4n^2 - 1} \right] = r i(t)$$

conduction :

D_1, D_2 D_3, D_4

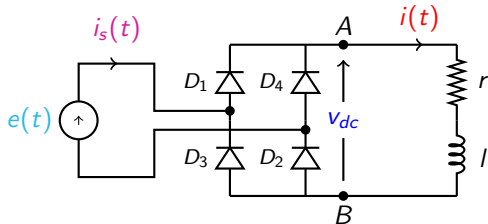


$$\langle i \rangle = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{E}{r}$$

$$i_s(t) = \frac{e(t)}{r}$$

Redressement : conversion AC/DC

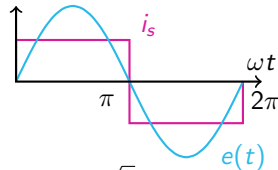
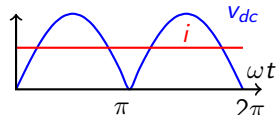
Charge résistive/inductive : $v_{dc}(t) = r i(t) + l \frac{di}{dt}$
avec $l \rightarrow \infty$



$$v_{dc} = v_A - v_B = \max(e(t), -e(t)) = |e(t)|$$

conduction :

D_1, D_2 D_3, D_4

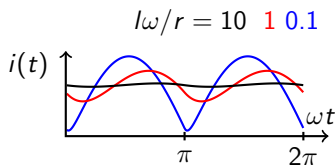
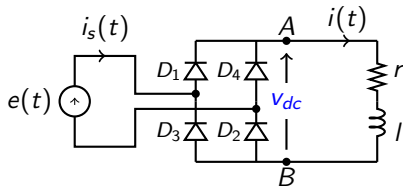


$$e(t) = \sqrt{2} E \sin(\omega t) \quad \leadsto \quad \langle v_{dc} \rangle = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \quad i = \langle i \rangle = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{E}{r}$$

$$v_{dc}(t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} E \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cos(2n\omega t)}{4n^2 - 1} \right] \quad i_s(t) = \frac{4}{\pi} i \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin((2n+1)\omega t)}{2n+1}$$

Redressement : conversion AC/DC

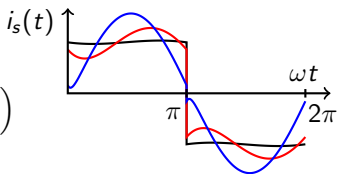
Charge résistive/inductive : $v_{dc}(t) = r i(t) + l \frac{di}{dt}$



$$v_{dc}(t) = |e(t)| = \sqrt{2}E |\sin(\omega t)|$$

$$v_{dc}(t) = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi} - \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \Re(e^{j2n\omega t})$$

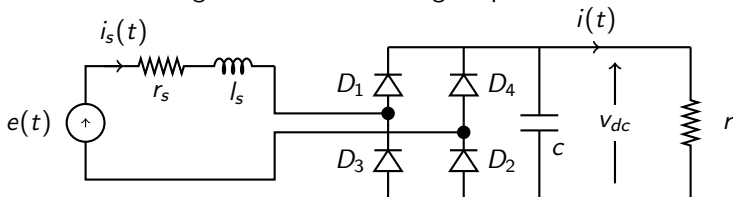
$$i(t) = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi} \frac{1}{r} - \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \Re(\bar{I}_n e^{j2n\omega t})$$



$$V_n = \frac{4E}{\pi(4n^2 - 1)} \quad \bar{I}_n = \frac{V_n}{r + j l 2n\omega}$$

Redressement : conversion AC/DC

Charge résistive avec filtrage capacitif



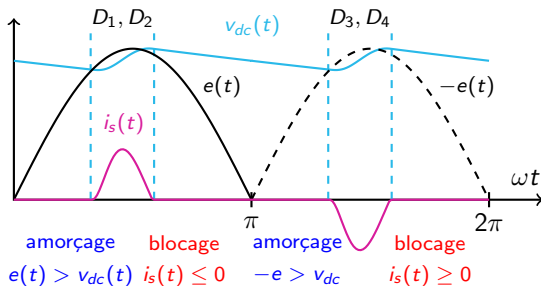
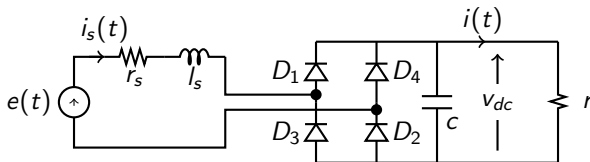
$$\text{diodes bloquées : } \begin{cases} v_{D1} + v_{D2} = e(t) - v_{dc}(t) \\ v_{D3} + v_{D4} = -e(t) - v_{dc}(t) \\ i(t) = \frac{v_{dc}}{r} = -C \frac{dv_{dc}}{dt} \end{cases}$$

$$(D_1, D_2) \text{ conduisent si } e(t) > v_{dc}(t) : \begin{cases} e(t) - v_{dc}(t) = r_s i_s(t) + l_s \frac{di_s}{dt} \\ i_s(t) = \frac{v_{dc}}{r} + C \frac{dv_{dc}}{dt} \end{cases}$$

$$(D_3, D_4) \text{ conduisent si } -e(t) > v_{dc}(t) : \begin{cases} -e(t) - v_{dc}(t) = -r_s i_s(t) - l_s \frac{di_s}{dt} \\ -i_s(t) = \frac{v_{dc}}{r} + C \frac{dv_{dc}}{dt} \end{cases}$$

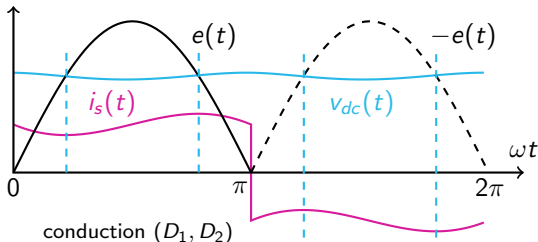
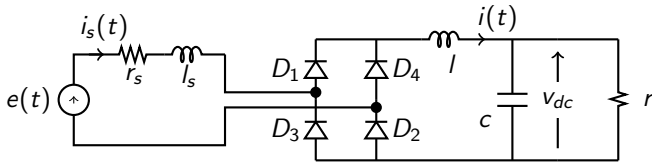
Redressement : conversion AC/DC

Charge résistive avec filtrage capacitif



Redressement : conversion AC/DC

Charge résistive avec filtrage capacitif et inductif

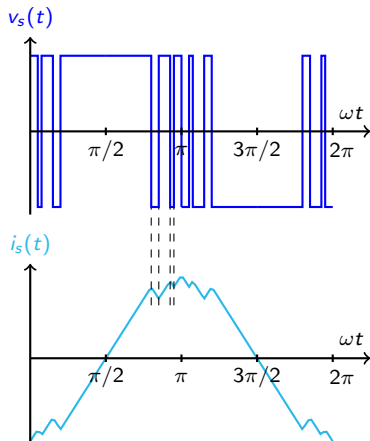
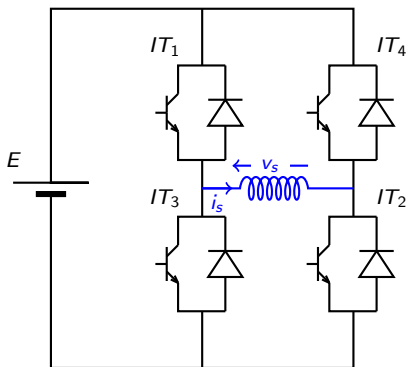


$$(l + l_s) \frac{di_s}{dt} + r_s i_s = E - v_{dc}(t)$$

$$i_s = c \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}(t)}{r}$$

Ondulation : conversion DC/AC

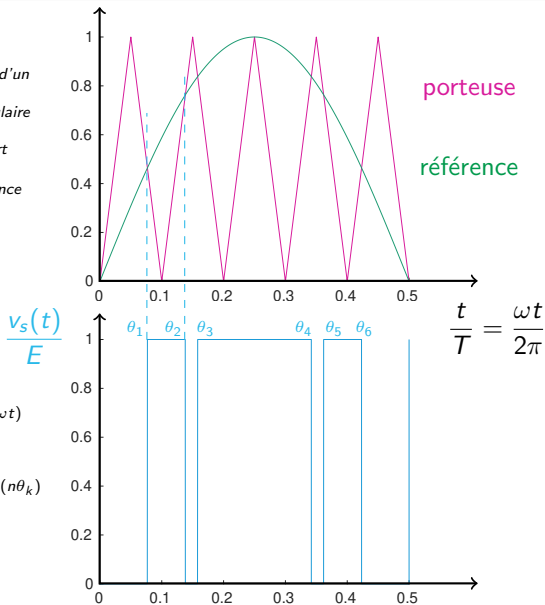
charge inductive : $v_s(t) = L \frac{di_s}{dt}$



$$v_s(t) = \begin{cases} -E & (T_3, T_4) \text{ conduisent} \\ 0 & T_3 \text{ ou } T_2 \text{ conduisent} \\ E & (T_1, T_2) \text{ conduisent} \end{cases}$$

Ondulation : Modulation de largeur d'impulsion (MLI)

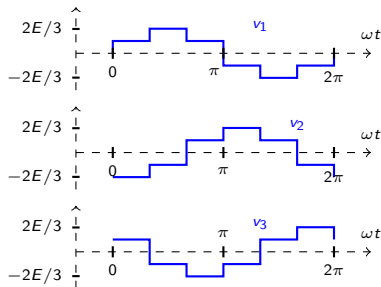
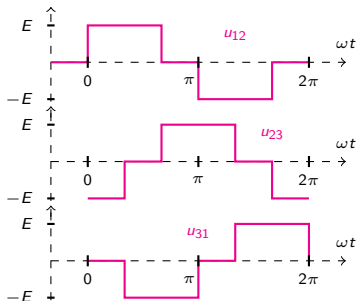
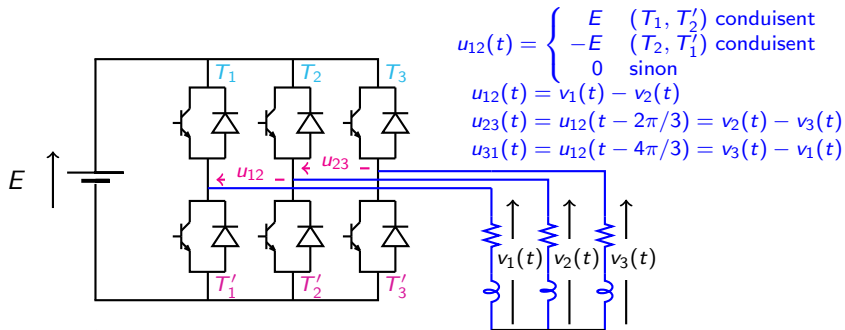
comparaison d'un
signal triangulaire
par rapport
à une référence



$$v_s(t) = E \sum_{n=1}^{\infty} f_n \sin(n\omega t)$$

$$f_n = \frac{4}{n\pi} \sum_k (-1)^{1+k} \sin(n\theta_k)$$

Onduleur triphasé : conversion DC/AC



Back to back : conversion AC/AC via un bus DC

