

## Gradateurs monophasés et triphasés

### Plan de l'étude :

#### 1) Les gradateurs monophasés :

- Présentation
- Sur charge résistive : application à l'éclairage
- Sur charge R-L : variation de vitesse de moteur
- Charge inductive : compensation d'énergie réactive

#### 2) Les gradateurs triphasés :

- Différents principes
- Montages tout thyristors
- Gradateur en étoile
- Gradateur en triangle
- Choix d'un gradateur triphasé

### Bibliographie :

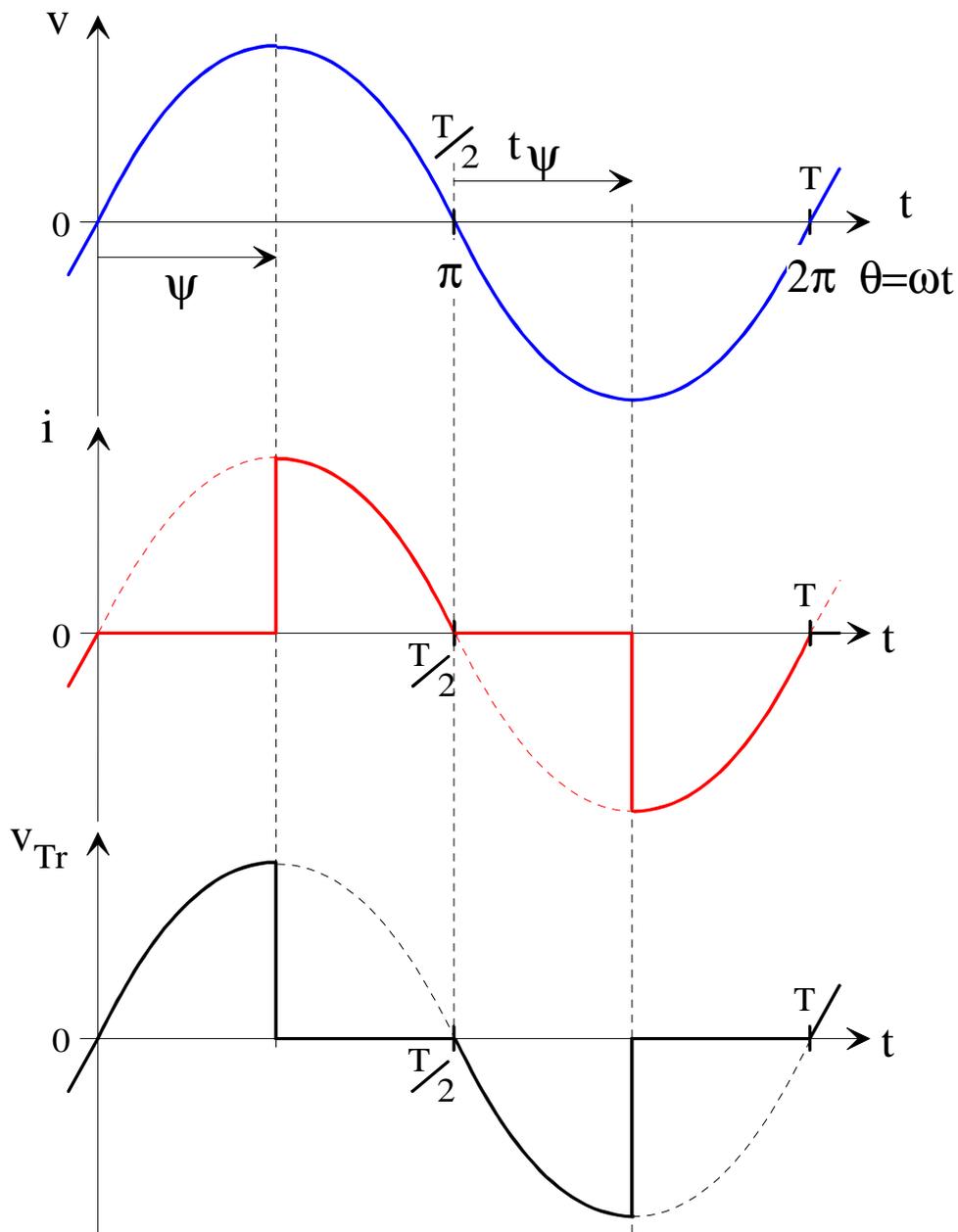
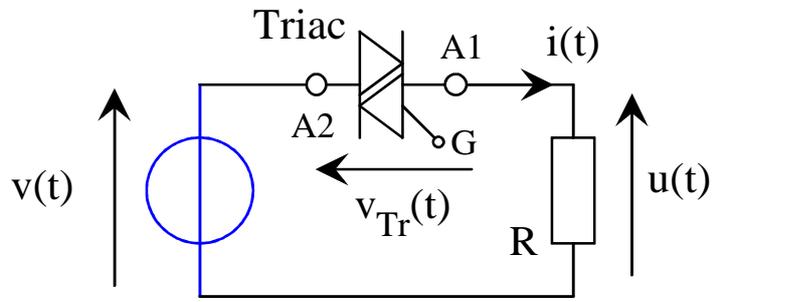
- *L'électronique de puissance - Volume 2 La conversion AC-AC*  
C. ROMBAUT, G. SEGUIER, R. BAUSIERE, TEC&DOC, 1986.
- *L'électronique de puissance : les fonctions de base et leurs applications - Cours et exercices résolus,*  
G. SEGUIER, DUNOD, 7eme édition, 1998, 424 pages.
- *Génie électrique. du réseau au convertisseur. apprendre par l'exemple,*  
J.-P. COCQUERELLE, éditions TECHNIP.
- *Norme européenne, Norme française, NF EN 61000-3-2,*  
1er tirage, août 1995.

## Gradateur monophasé sur charge R

Schéma de principe :

$$v(t) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

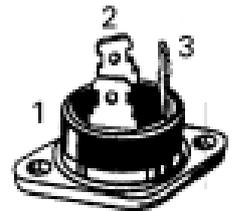
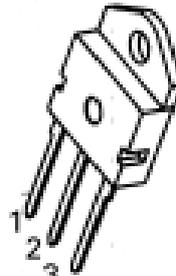
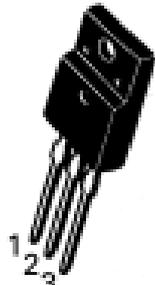
$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$$



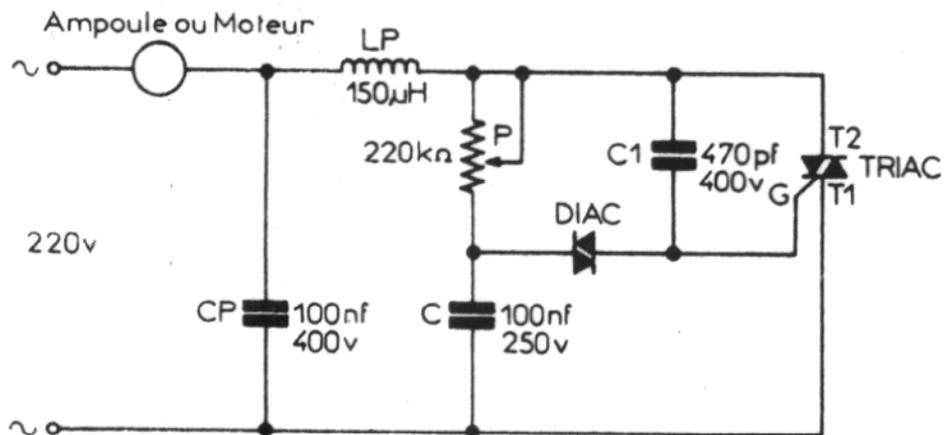
## Exemples de réalisations de gradateur

### Le composant TRIAC :

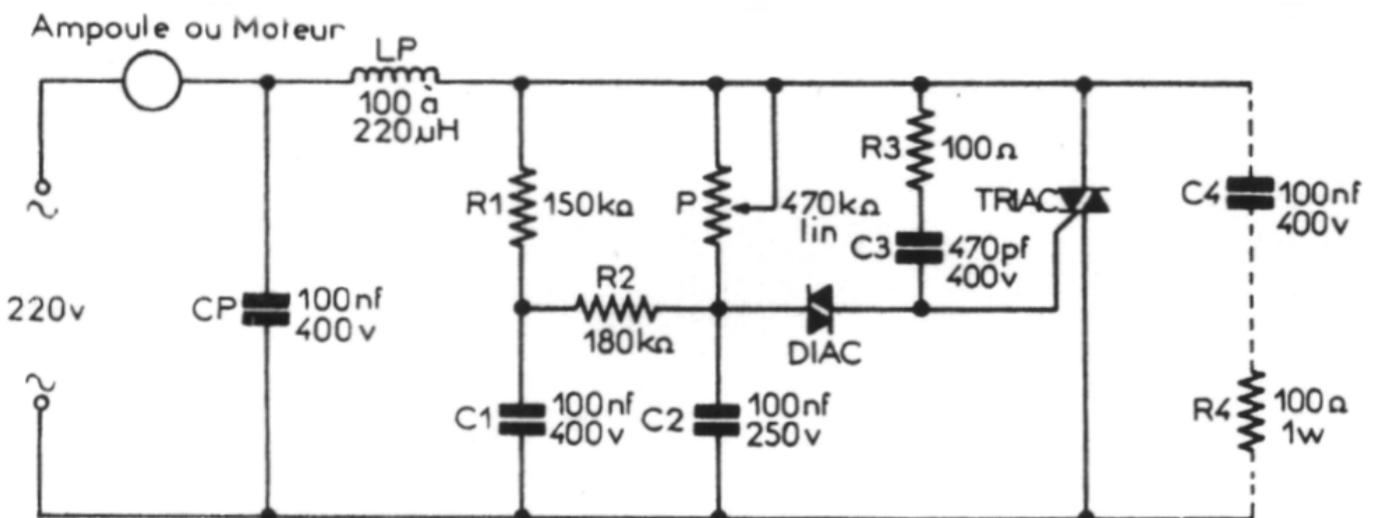
Brochage	1	2	3
1, 2, 3, 4	A1	A2	G



### Gradateur économique :

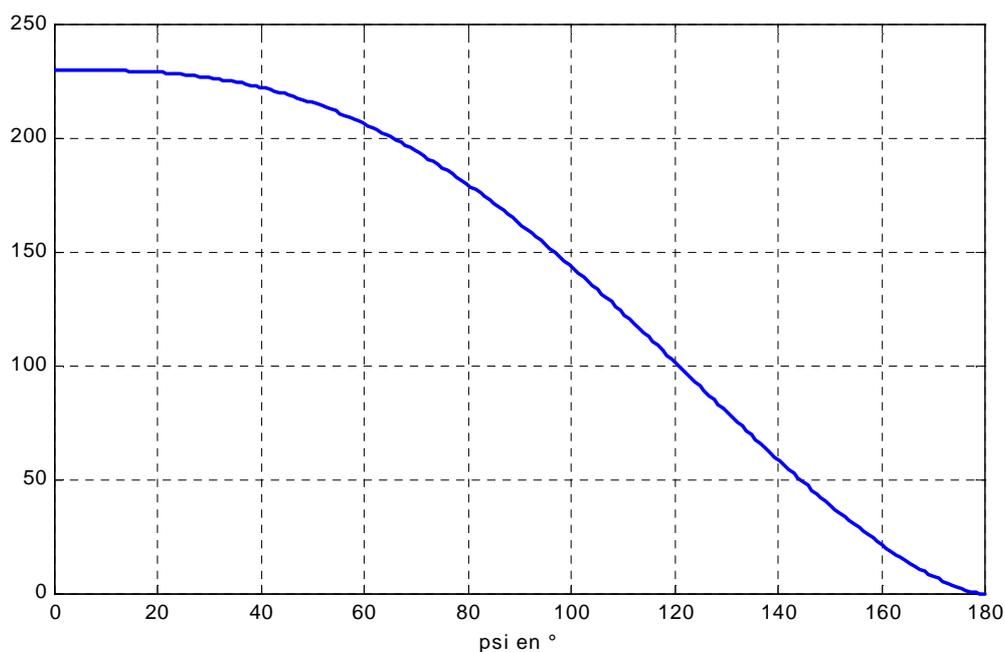


### Gradateur à forte plage de variation :

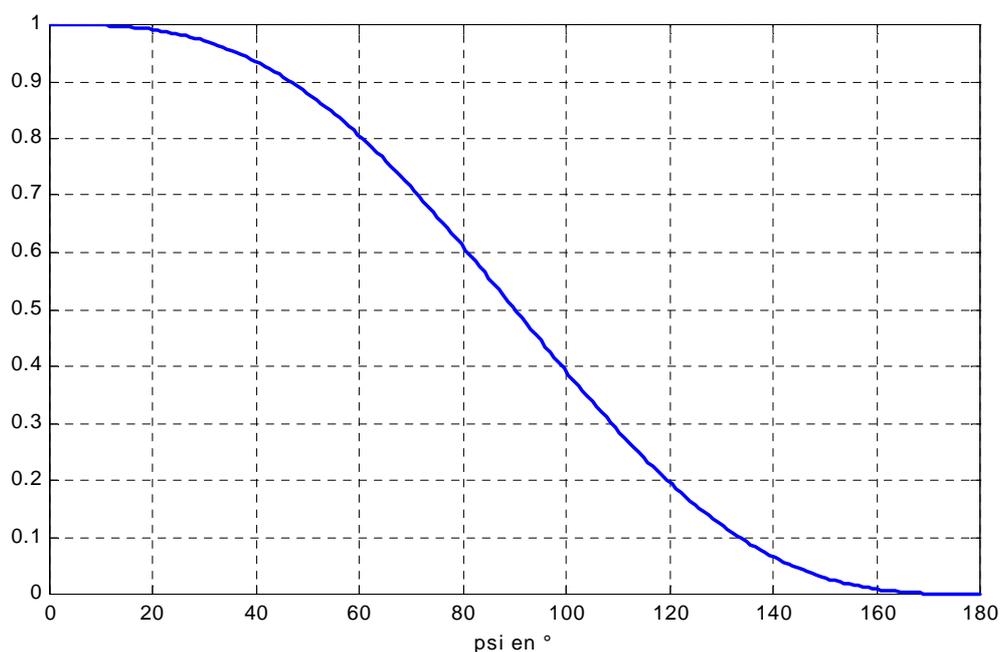


## Caractéristiques de transfert

$$U_{\text{eff}} = V_{\text{eff}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin(2\psi)}{2\pi}} \text{ en fonction de } \psi \text{ en } ^\circ :$$



$$\frac{P_{\text{charge}}}{P_{\text{max}}} = 1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin(2\psi)}{2\pi} \text{ en fonction de } \psi \text{ en } ^\circ :$$



## Fondamental du courant réseau

Calcul du fondamental du courant :

$$i_1(t) = A_1 \cdot \cos(\omega t) + B_1 \cdot \sin(\omega t) \text{ avec } \omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$$

$$B_1 = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cdot \sin(\omega t) \cdot dt = \frac{4}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi} i(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \text{ avec } \theta = \omega t$$

$$A_1 = \frac{4}{2\pi} \int_{\psi}^{\pi} i(\theta) \cdot \cos(\theta) \cdot d\theta$$

$$\text{on pose } i(\theta) = \frac{v_s(\theta)}{R} = \frac{V\sqrt{2}}{R} \cdot \sin(\theta) \text{ pour } \theta \in [\psi; \pi]$$

$$A_1 = \frac{V\sqrt{2}}{R} \cdot \left[ \frac{\cos(2\psi)}{2\pi} - \frac{1}{2\pi} \right] \text{ et } B_1 = \frac{V\sqrt{2}}{R} \cdot \left[ 1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin(2\psi)}{2\pi} \right]$$

Valeur efficace :

$$\frac{I_1}{I_0} = \sqrt{\left( \frac{\cos(2\psi)}{2\pi} - \frac{1}{2\pi} \right)^2 + \left( 1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin(2\psi)}{2\pi} \right)^2}$$

Argument du courant :

$$\varphi_1 = \text{Arctan} \left( \frac{A_1}{B_1} \right)$$

Puissance réactive :

$$Q_1 = V \cdot I_1 \cdot \sin(\varphi_1)$$

Puissance apparente :

$$S = V_{\text{Seff}} \cdot I_{\text{Ceff}} \quad S_1 = V_{\text{Seff}} \cdot I_{1\text{eff}}$$

Puissance déformante :

$$S = \sqrt{(P_1^2 + Q_1^2 + D^2)} = \sqrt{(S_1^2 + D^2)}$$

$$\frac{D}{V \cdot I_0} = \sqrt{\left( \frac{I_{\text{Ceff}}}{I_0} \right)^2 - \left( \frac{I_{1\text{eff}}}{I_0} \right)^2}$$

Facteur de puissance :

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{R \cdot I_{\text{Ceff}}^2}{V_{\text{Seff}} \cdot I_{\text{Ceff}}} = \frac{I_{\text{Ceff}}}{I_0}$$

## Evolution des harmoniques

Calcul des harmoniques du courant réseau :

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n \cdot \omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin(n \cdot \omega t)$$

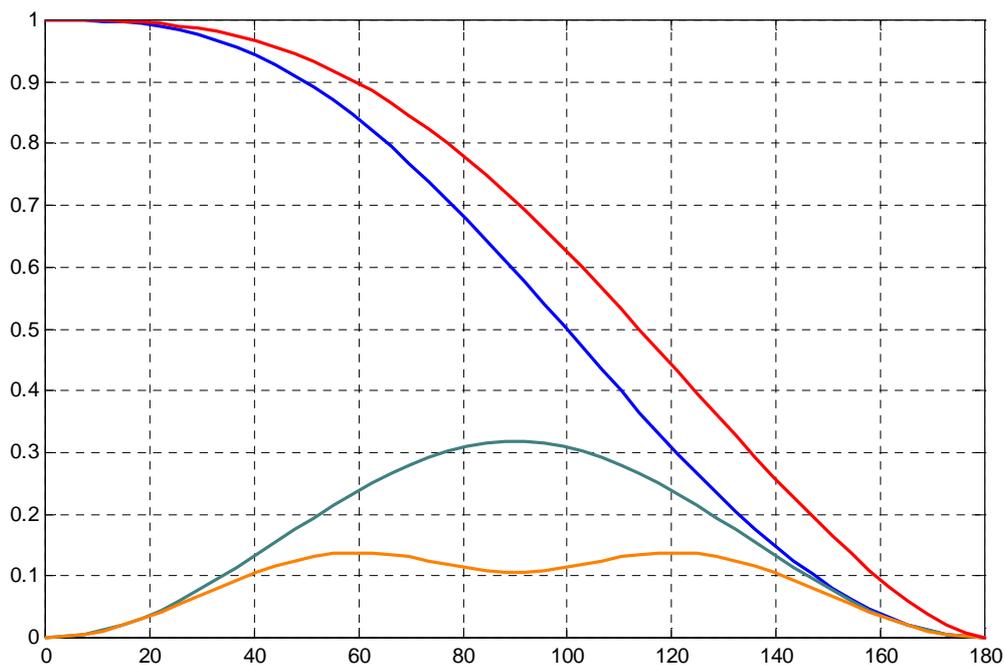
$$A_1 = \frac{V\sqrt{2}}{R} \left[ \frac{\cos(2\psi)}{2\pi} - \frac{1}{2\pi} \right] \quad \text{et} \quad A_{2k+1} = \frac{V\sqrt{2}}{R} \left[ \frac{\cos(2(k+1)\psi) - 1}{2(k+1)\pi} - \frac{\cos(2k\psi) - 1}{2k\pi} \right]$$

$$B_1 = \frac{V\sqrt{2}}{R} \left[ 1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin(2\psi)}{2\pi} \right] \quad \text{et} \quad B_{2k+1} = \frac{V\sqrt{2}}{R} \left[ \frac{\sin(2(k+1)\psi)}{2(k+1)\pi} + \frac{\sin(2k\psi)}{2k\pi} \right]$$

Variation des trois premiers harmoniques

et du courant efficace en fonction de  $\psi$  en degrés :

$$X_{2k+1} = \frac{I_{2k+1}}{I_0} = \frac{\sqrt{\left(\frac{A_{2k+1}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{B_{2k+1}}{\sqrt{2}}\right)^2}}{V/R}$$



## Gradateur monophasé - Charge R-L

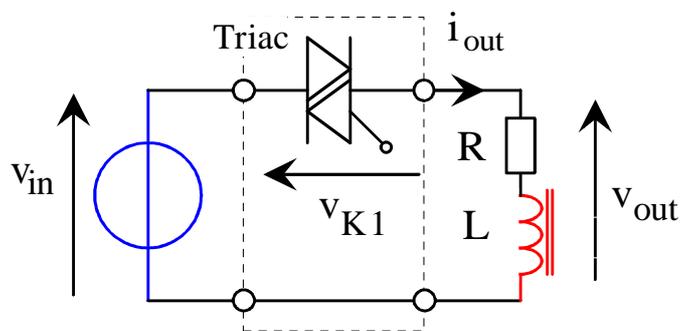
Schéma de principe :

$$v_s(t) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$$

$$\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$$

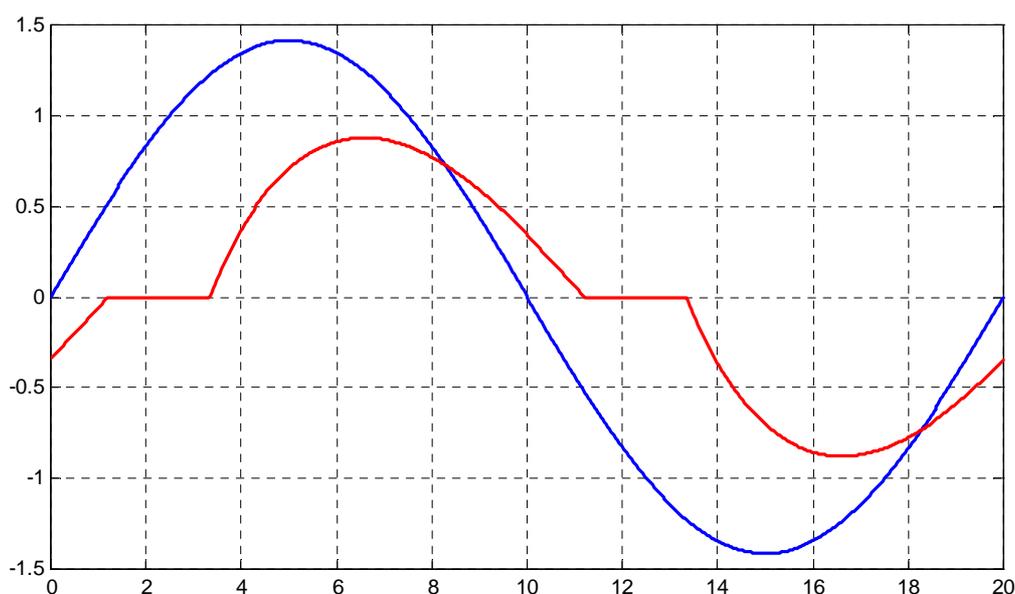
$$R = 10 \Omega$$

$$L = 50 \text{ mH}$$



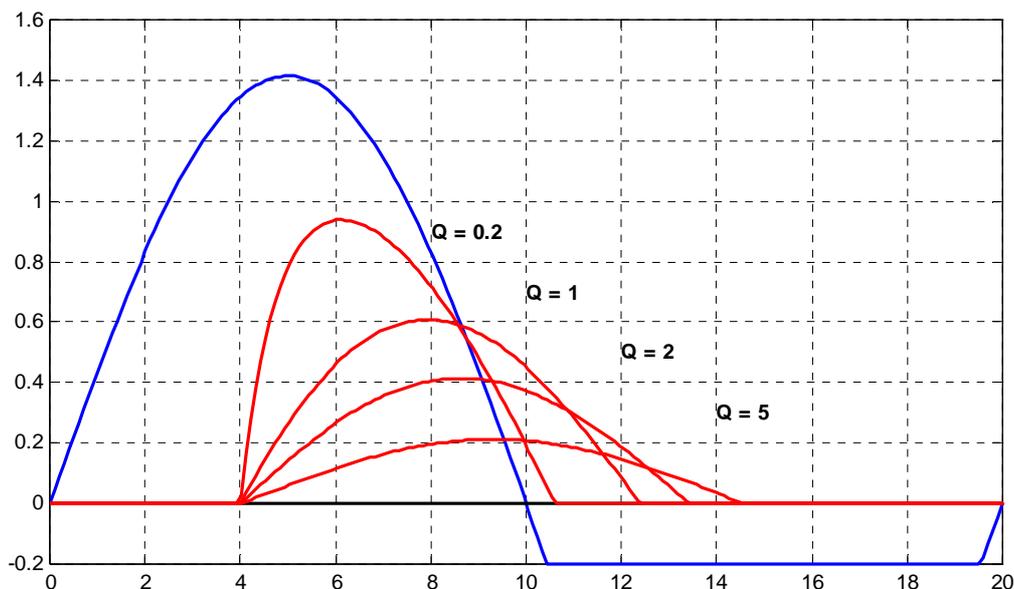
$$Q = \frac{L\omega}{R} = 1,57 ; \varphi = \arctan\left(\frac{L\omega}{R}\right) = 57^\circ ; \psi = 72^\circ$$

$$x(\theta)_{\theta > \psi} = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2}} \cdot \left( \sin(\theta - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-\frac{(\theta - \psi)}{Q}} \right)$$

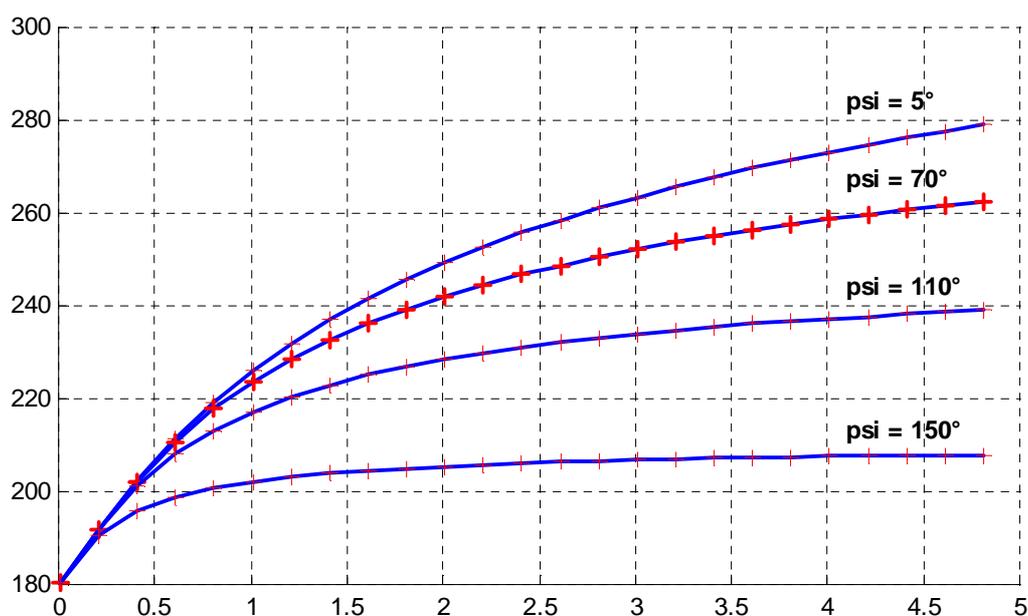


## Gradateur monophasé / Charge R-L

Instant d'annulation du courant pour  $Q = [ 0.5 ; 1 ; 2 ; 5 ]$  et  $\psi = 72^\circ$  :



$t_1$  (en ms) en fonction de  $Q$

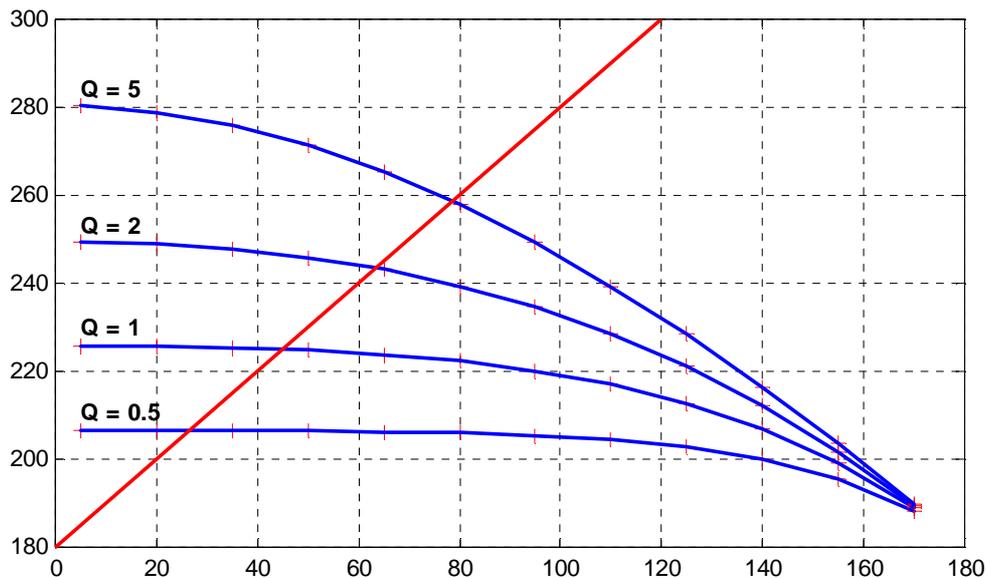


(valable pour  $\omega \cdot t_1 < \psi$ )

## Etude pour différentes charges

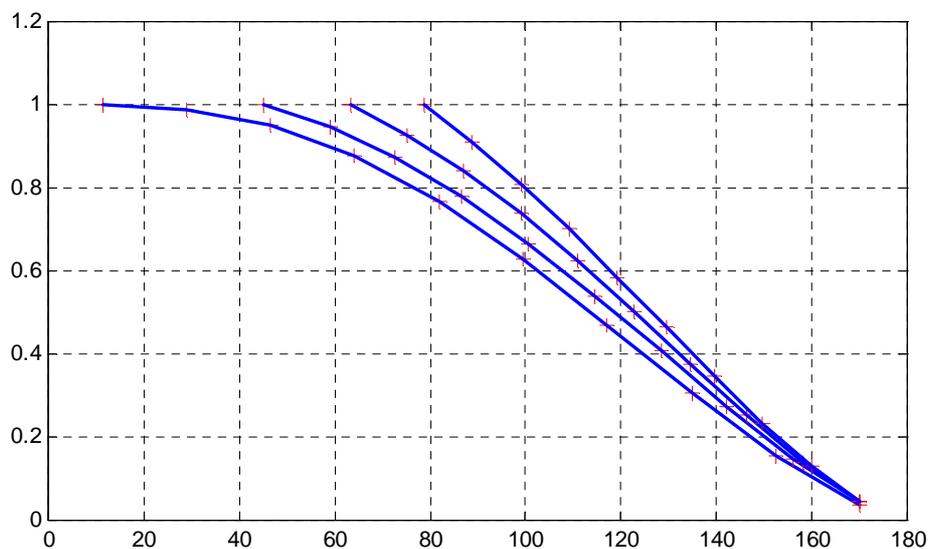
Instant d'annulation du courant  $t_1$  (en ms) en fonction de  $\psi$  (en °)

pour  $Q = [ 0.5 ; 1 ; 2 ; 5 ]$  :



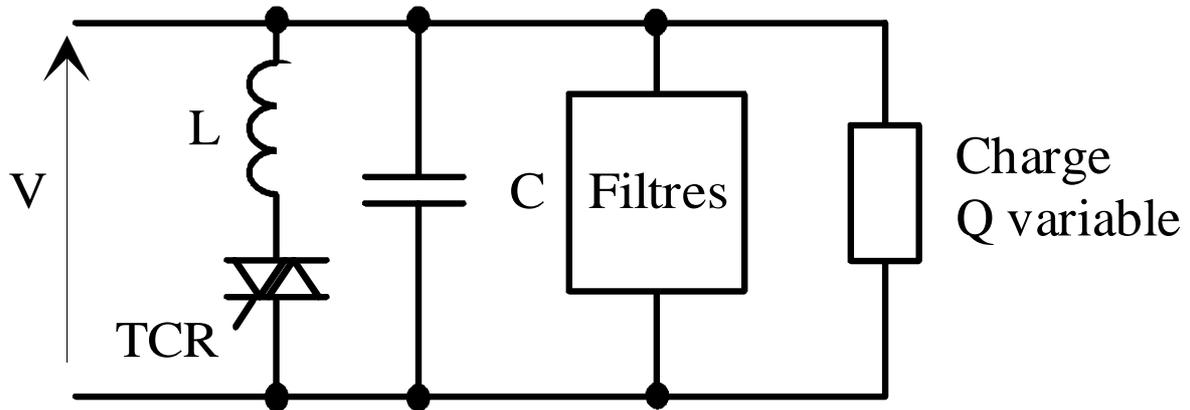
$U_{C\text{ eff}}$  en fonction de  $\psi$  (en °) pour  $Q = [ 0.5 ; 1 ; 2 ; 5 ]$  :

$$\frac{U_{C\text{ eff}}}{V_{\text{Seff}}} = x(\psi)_{\psi > \varphi} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \left( \theta_1 - \psi - \frac{1}{2} \cdot (\sin(2 \cdot \theta_1) - \sin(2 \cdot \psi)) \right)}$$

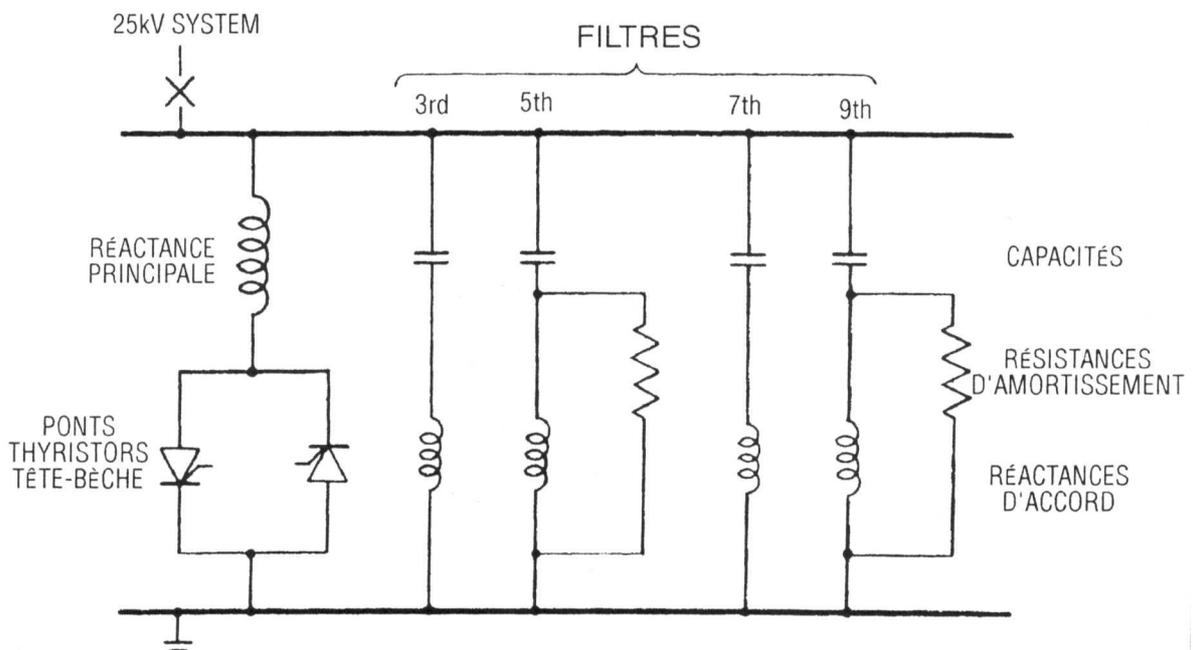


## Gradateur monophasé - Charge L

Compensation d'énergie réactive :



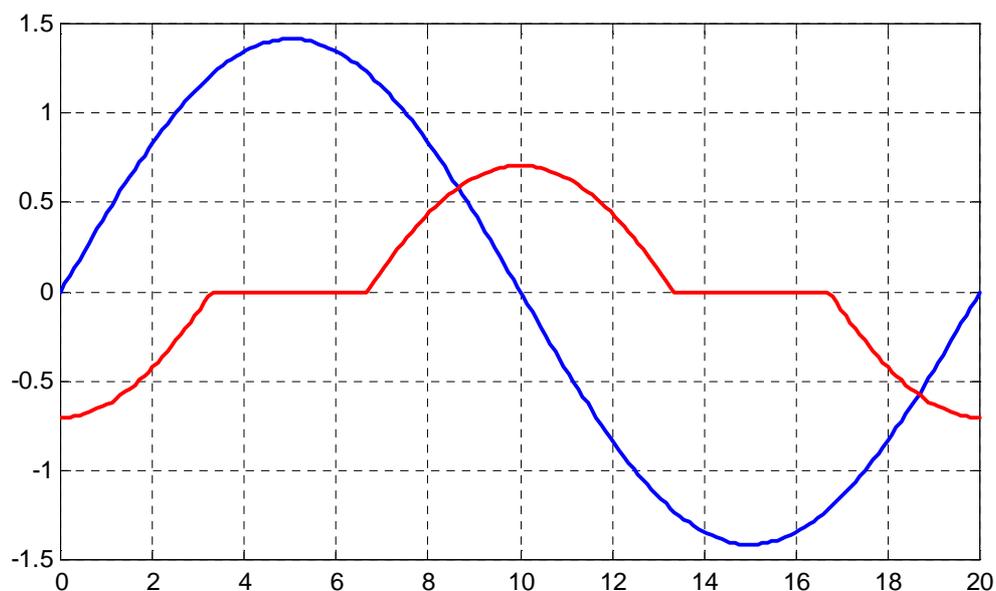
Application à l'interconnexion transmanche :



Yves MACHEFERT-TASSIN et Louis JULIEN - REE N°2 - juillet 1995

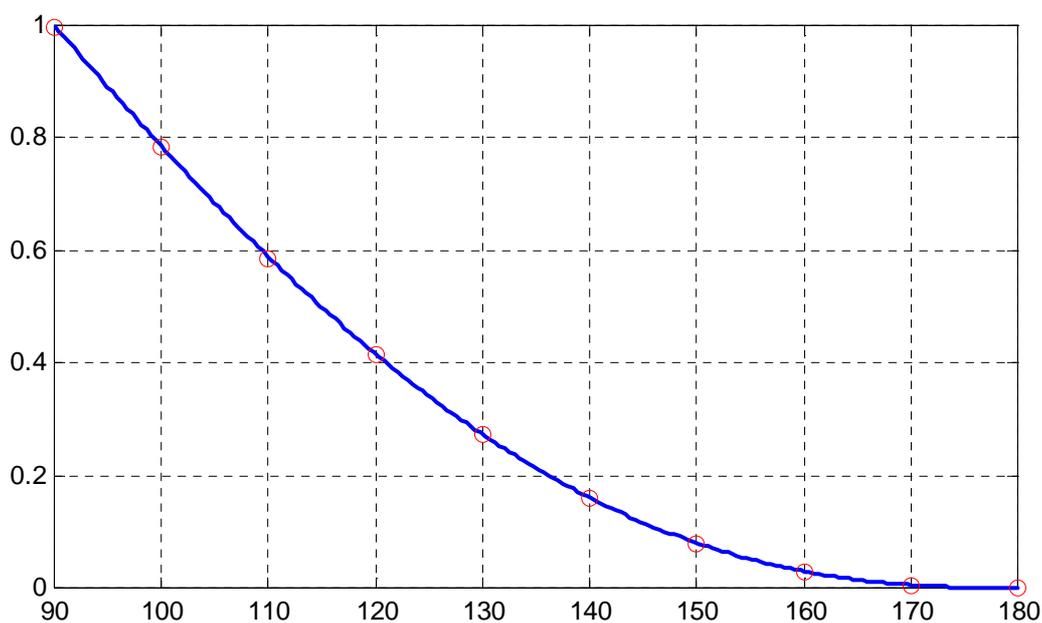
## Evolution du courant (gradateur + L)

$$\frac{i_{ch}(t)}{I_{max}} = \cos(\psi) - \cos(\omega \cdot t) \text{ pour } \psi = 120^\circ$$



### Evolution du courant efficace en fonction de $\psi$ en $^\circ$

$$\frac{I_{Leff}}{I_{eff\ max}} = \sqrt{\left( \frac{2}{\pi} \left[ (\pi - \psi)(2\cos^2(\psi) + 1) - \frac{1}{2}\sin(2\psi) + 4\cos(\psi)\sin(\psi) \right] \right)}$$



## Harmoniques du compensateur

Spectre du courant de ligne :

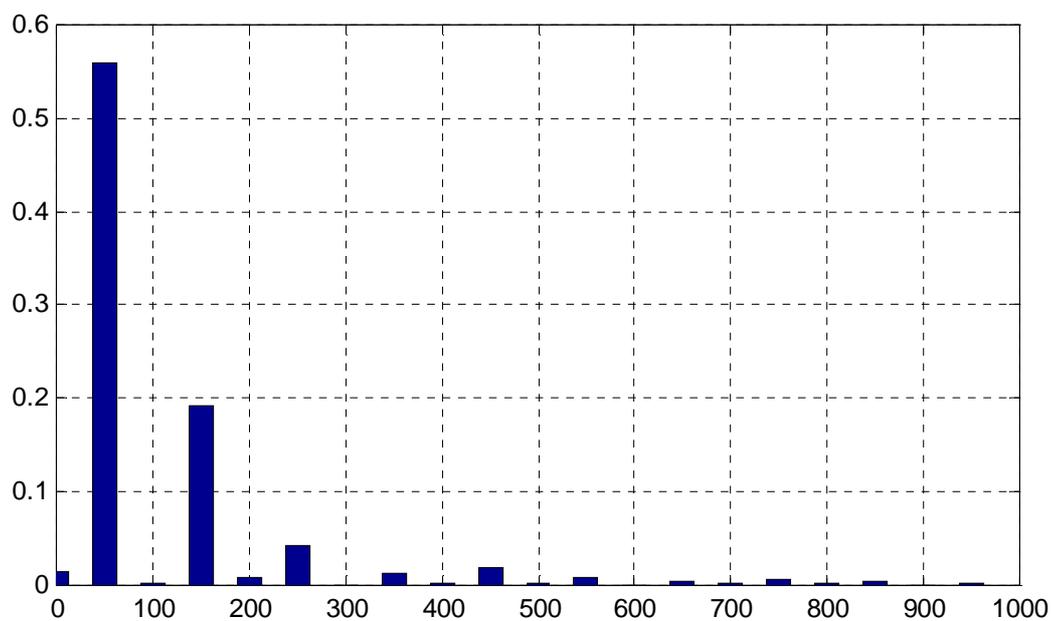
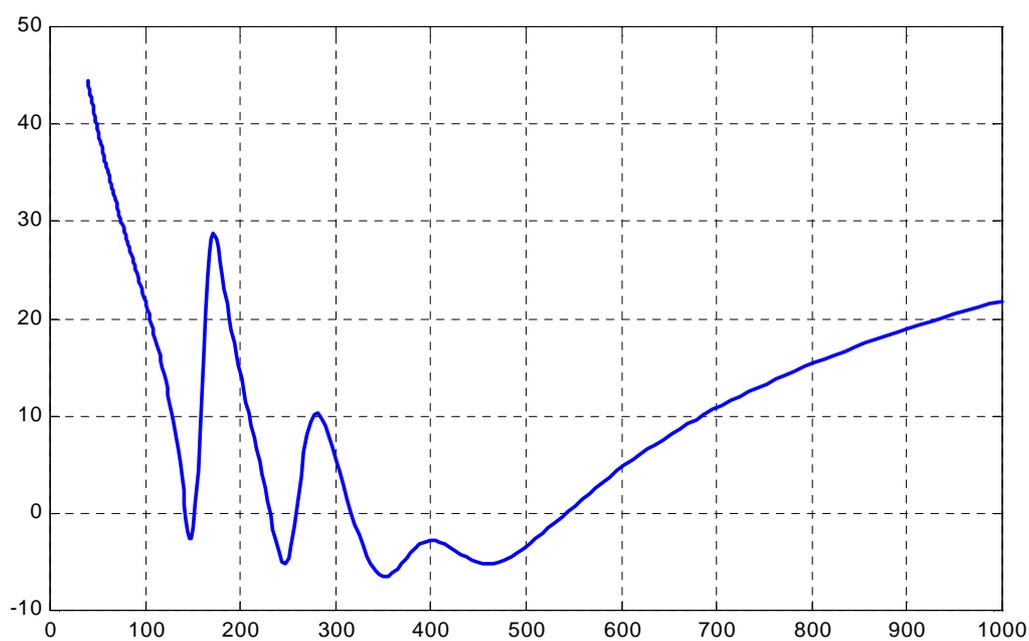


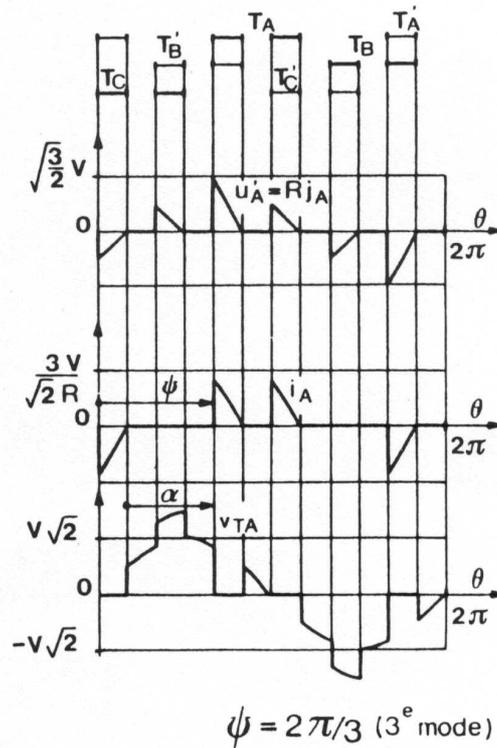
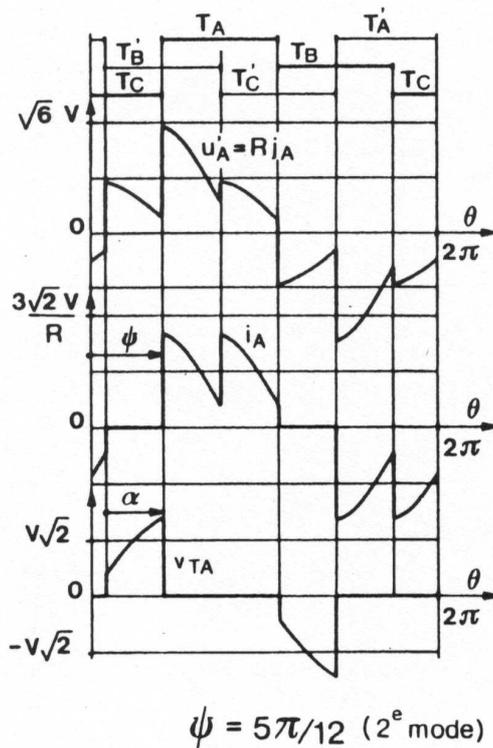
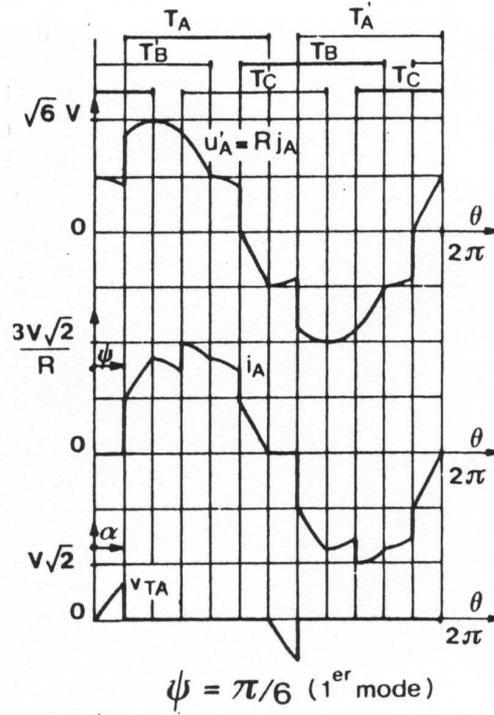
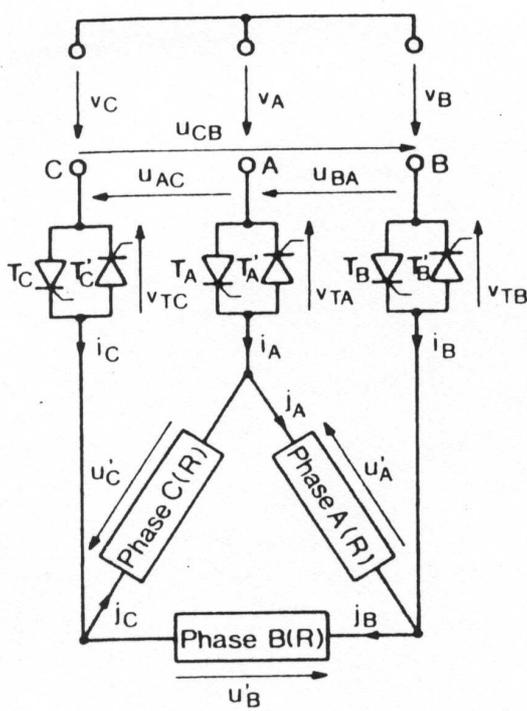
Diagramme d'impédance du filtre :

$$G(f) = 20 \cdot \log_{10} \left( |Z_{\text{total}}| \right) \text{ en fonction de la fréquence } f$$

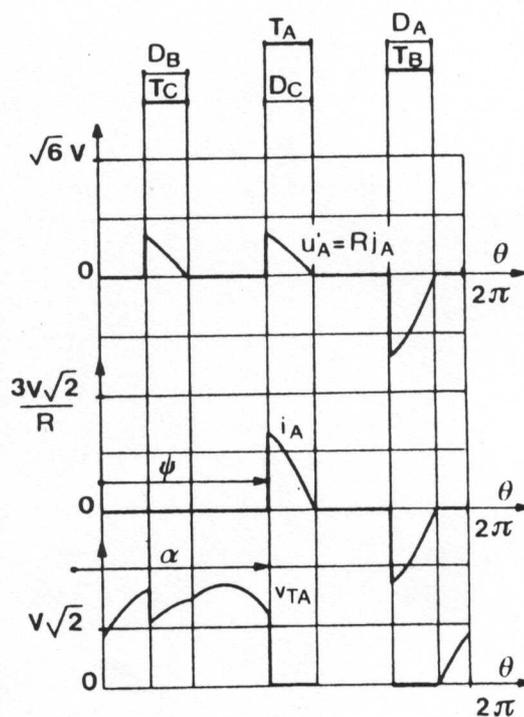
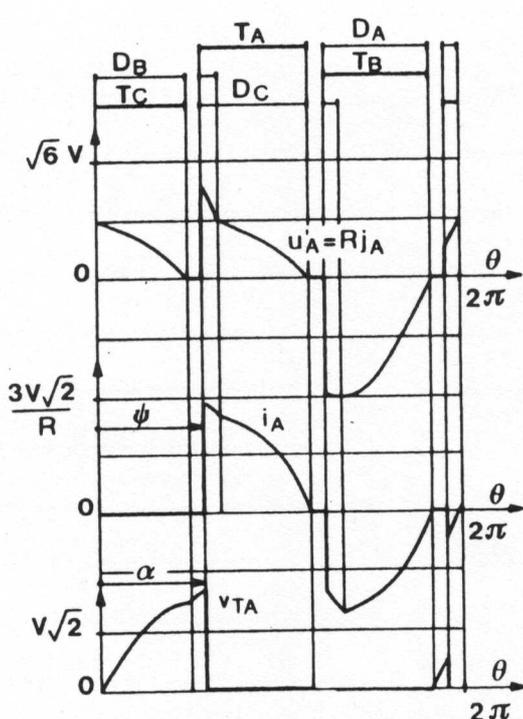
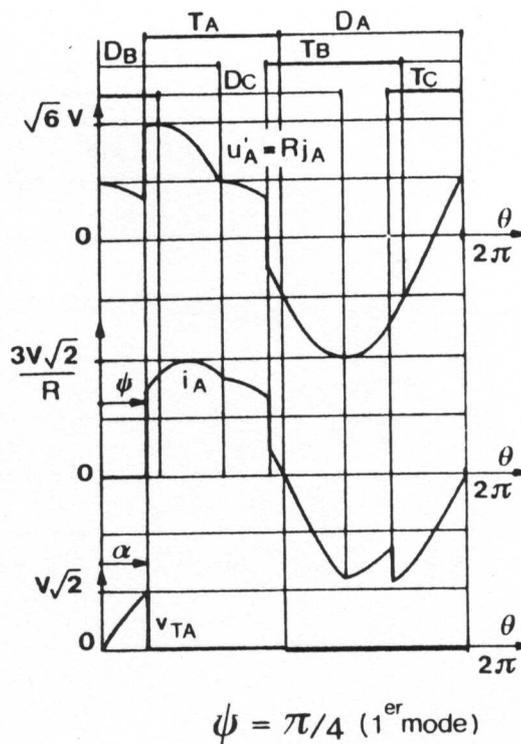
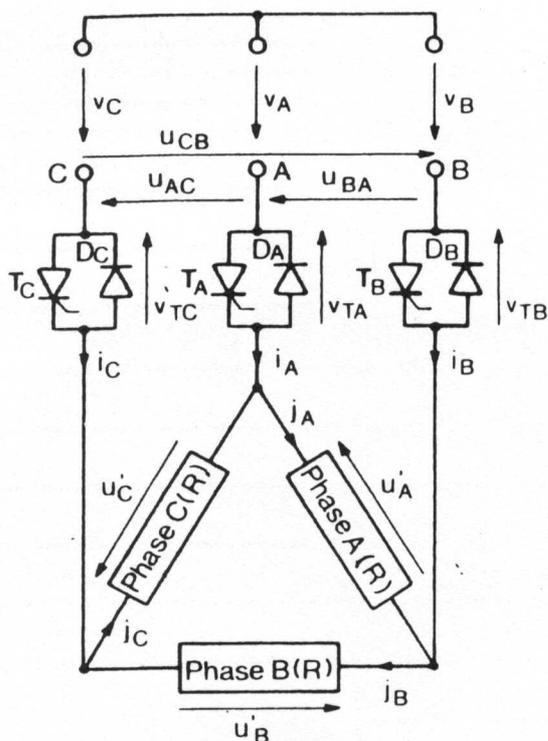


## Les gradateurs triphasés

Montage tout thyristors :

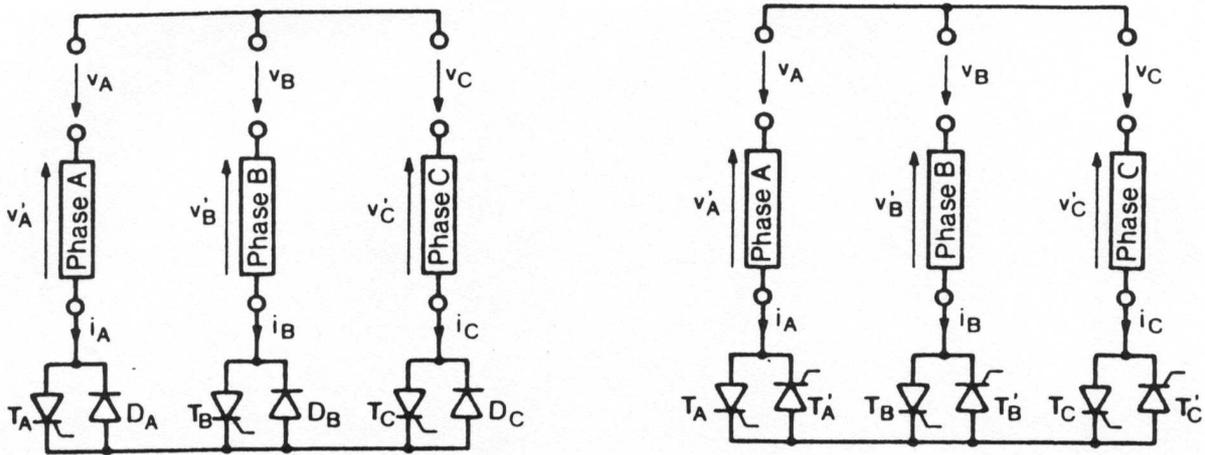


# Gradateur en montage mixte

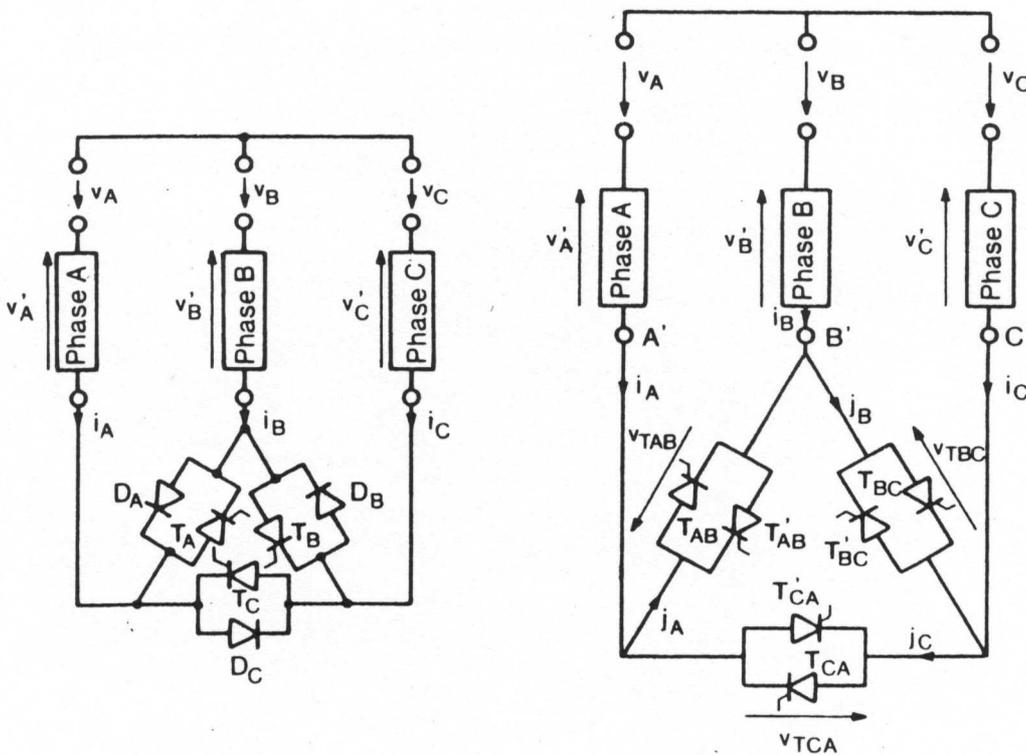


## Différents couplages des gradateurs

### Couplage étoile :

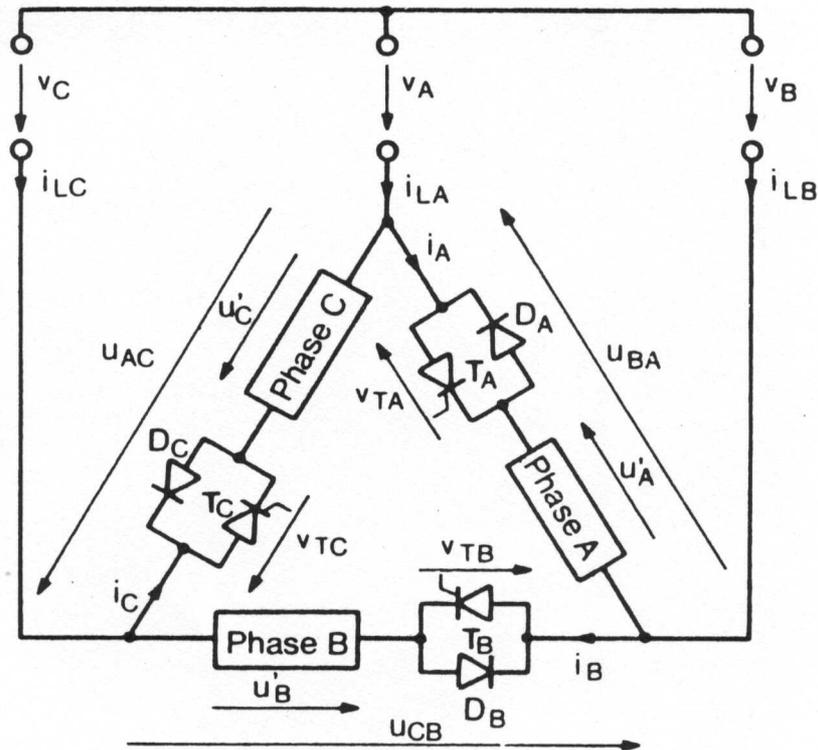


### Couplage triangle :



## Comparaison des gradateurs triphasés

Groupeur triangle :



- Réglage séparé du courant par phase.
- Amélioration du facteur de puissance.
- Réduction des harmoniques du courant de ligne.
- Tenue en tension et en courant des composants.
- Simplicité de la commande.