

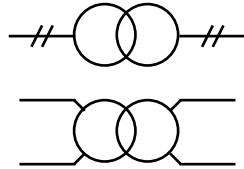
## C24 - Conversions alternatif - alternatif.

### Transformateur de tension monophasée

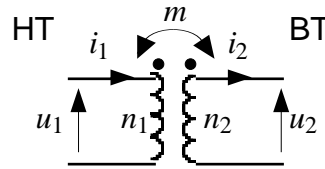
Conversion  
alternatif /  
alternatif



Symbole



Schéma



Transformateur parfait

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} = m$$

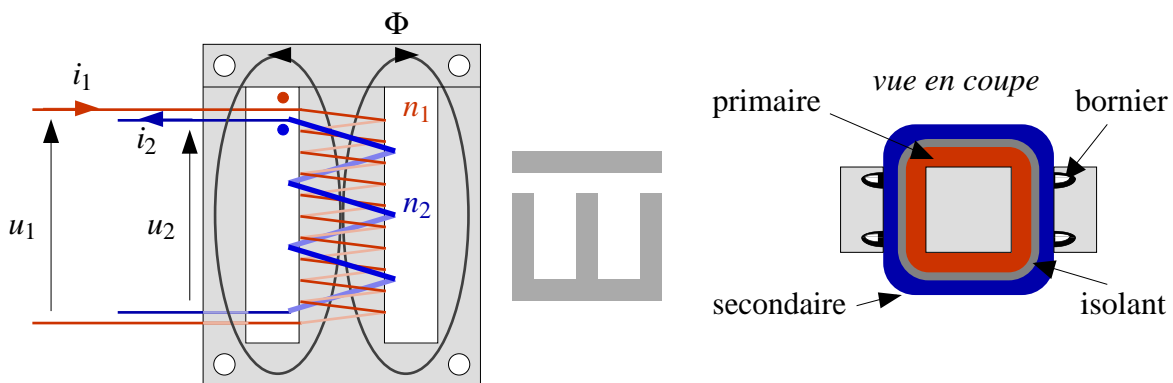
$m < 1$  : transformateur *abaisseur* de tension (exemple : passage HT → BT)

$m > 1$  : transformateur *élevateur* de tension

**Constitution** : le circuit magnétique d'un transformateur monophasé est constitué de tôles en forme de "E" et de "I" assemblées «tête-bêche». Les enroulements primaire et secondaire sont bobinés au centre, dans le même sens, primaire [1] à l'intérieur et secondaire [2] à l'extérieur.

NB1 : il existe aussi des transformateurs à circuit magnétique torique (plus performant).

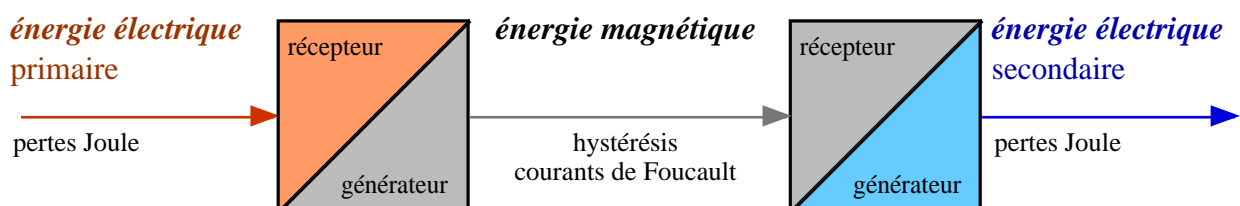
NB2 : pour diminuer les pertes, les tôles sont en matériau (alliage Fe + Si) à faible rémanence (diminution des pertes par hystérésis) et isolées entre elles par un vernis (diminution des pertes par courants de Foucault, cf §C31).



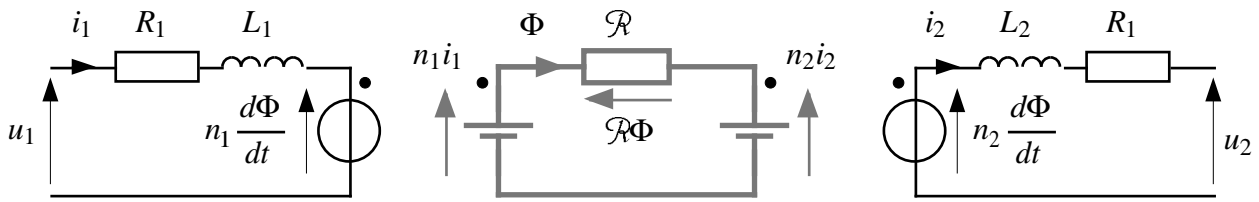
#### Orientation des conducteurs

Le sens de bobinage des enroulements autour du noyau (identique pour les deux enroulements) est repéré par un point (•) marquant le "haut" de chaque enroulement. Les bornes ainsi marquées sont dites *homologues* : des courants *entrant* par des bornes homologues dans chaque bobinage fonctionnant en tant que récepteur électrique généreraient des lignes de champ de même sens (donc des flux de même signe).

#### Bilan énergétique du transformateur



Circuits électriques et magnétique



$$u_1 - R_1 i_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} - n_1 \frac{d\Phi}{dt} = 0$$

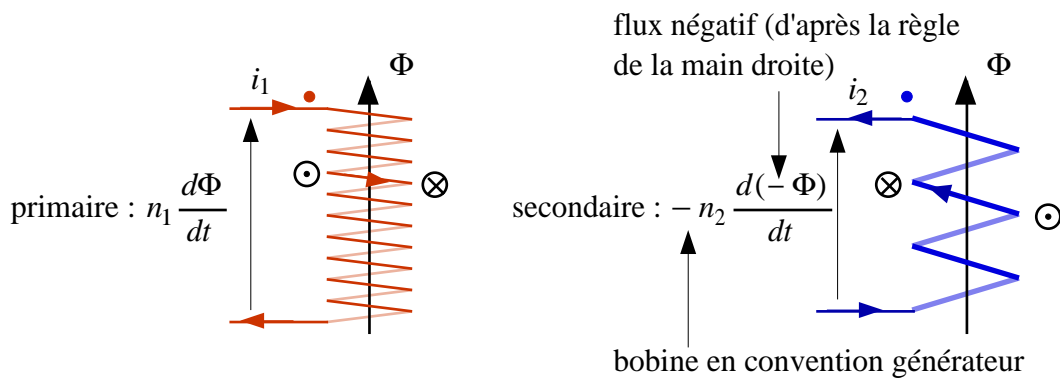
$$n_1 i_1 - n_2 i_2 - \mathcal{R}\Phi = 0$$

$$n_2 \frac{d\Phi}{dt} - R_2 i_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} - u_2 = 0$$

- $R$  résistances des fils de bobinage
- $L$  inductances dues aux fuites magnétiques
- $\mathcal{R}$  réluctance du circuit magnétique (supposé linéaire)
- $\Phi$  flux du champ magnétique
- $n.i$  forces magnétomotrices ou "ampères-tours"

⚠ Conventions de signes (soit :  $\Phi > 0$  par hypothèse) :

- Signe des fem : au primaire (récepteur) :  $u = n \frac{d\Phi}{dt}$  ; au secondaire (générateur) :  $u = -n \frac{d\Phi}{dt}$
- Signe du flux : selon la règle de la main droite (cf §C31)



• **Modèle électrique du transformateur parfait en régime alternatif sinusoïdal**

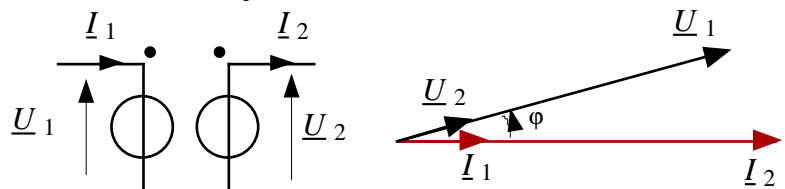
Le transformateur est "parfait" si toutes les pertes (électriques et magnétiques) sont négligées :

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= n_1 \frac{d\Phi}{dt} \\ u_2 &= n_2 \frac{d\Phi}{dt} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{U_2}{U_1} = m$$

$$n_1 i_1 - n_2 i_2 = 0 \Rightarrow \frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{m}$$

$$\text{et : } \frac{U_2}{I_2} = m^2 \frac{U_1}{I_1}$$

en posant :  $m = \frac{n_2}{n_1}$



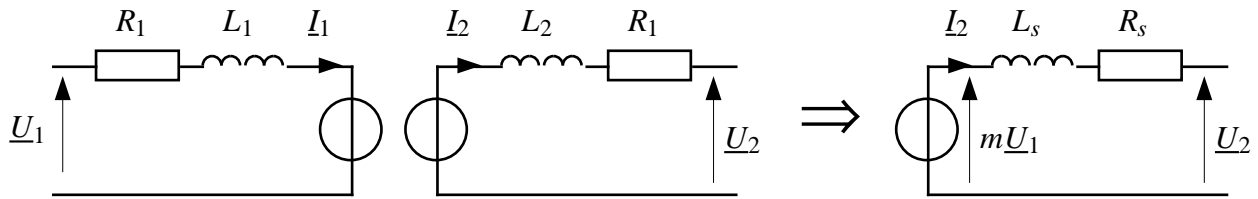
**Rendement** : le rendement est donc  $\eta = 100\%$ . L'angle  $\varphi$  est le même au primaire et au secondaire, car le facteur de puissance  $\cos\varphi$  au primaire est imposé par le facteur de puissance du récepteur. Comme  $\eta = 1$ , on a donc :  $U_{1\text{eff}} \cdot I_{1\text{eff}} \cdot \cos\varphi = U_{2\text{eff}} \cdot I_{2\text{eff}} \cdot \cos\varphi$ .

**Puissance apparente** :  $S = U_{1\text{eff}} \cdot I_{1\text{eff}} = U_{2\text{eff}} \cdot I_{2\text{eff}}$  [V.A]

**Impédances** : on constate que :  $Z_1 = \frac{Z_2}{m^2}$ . L'impédance  $Z_1$  est appelée impédance équivalente au secondaire "vue" du primaire (ou "ramenée" au primaire).

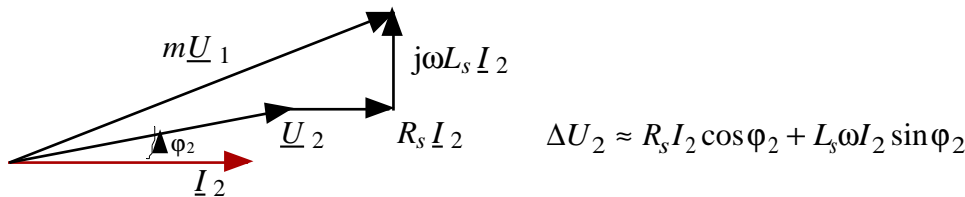
• **Modèle de Thévenin d'un transformateur monophasé réel**

Dans le modèle du transformateur réel on tient compte du fait que les enroulements sont à la fois résistifs et inductifs. De la relation qui précède on déduit le schéma de Thévenin équivalent :

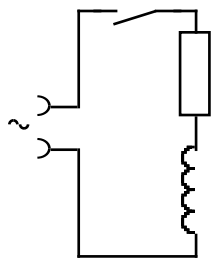


avec :  $\underline{Z}_s = R_2 + jL_2\omega + m^2(R_1 + jL_1\omega) \Rightarrow R_s = R_2 + m^2R_1$  et  $L_s = L_2 + m^2L_1$

D'où le diagramme vectoriel suivant (appelé "diagramme de Kapp"), dont on déduit la valeur approchée de la chute de tension au secondaire lorsque le transformateur est en charge :

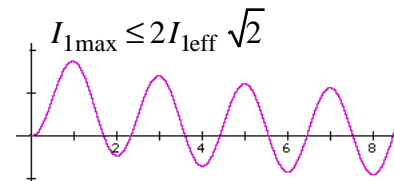


**Mise sous tension :** vu du primaire, un transformateur réel est équivalent à un circuit inductif. A la mise sous tension, il se comporte comme un circuit du 1er ordre en régime transitoire. Selon l'instant de mise sous tension, l'intensité absorbée peut atteindre des valeurs importantes :



$$Ri_1 + L \frac{di_1}{dt} = U_{1\text{eff}} \sqrt{2} \sin \omega t$$

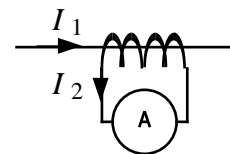
$$\Rightarrow i_1 = A \sin(\omega t - \phi) + B e^{-t/\tau}$$



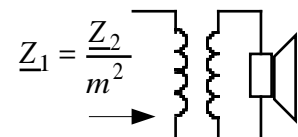
• **Autres types de transformateurs**

- **Transformateur de mesure :** transformateur utilisé pour adapter la gamme et assurer l'isolation par rapport au dispositif mesuré d'un voltmètre ou d'un ampèremètre.

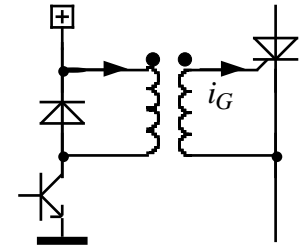
- **Transformateur de courant :** transformateur de mesure abaisseur de courant (donc éleveur de tension), soit :  $m > 1$ . On l'utilise notamment pour mesurer l'intensité d'un courant fort. Le primaire peut alors se réduire à une seule spire ! Ce type de transformateur s'utilise avec secondaire en court-circuit (dans le cas contraire, la tension apparaissant au secondaire pourrait être très élevée).



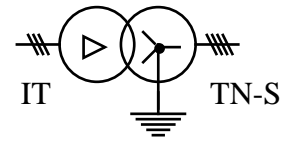
- **Transformateur d'impédance :** transformateur utilisé pour adapter l'impédance de deux circuits. Exemples : en audio, sortie d'un ampli BF dont la charge est un haut-parleur d'impédance normalisée (  $8\Omega$  à  $1000\text{Hz}$  ) ; en réseaux, adaptation d'impédance entre lignes de normes différentes (cf §B31).



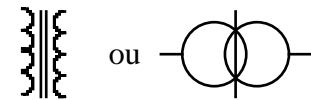
- *Transformateur d'impulsions* : transformateur utilisé pour la commande (isolée) de gachette des thyristors et des triacs. Il est important de respecter le sens de branchement des bobinages, puisque l'impulsion de courant que le transformateur transmet est orientée dans le sens de conduction des semi-conducteurs.



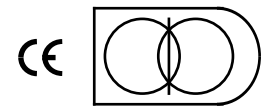
- *Transformateur d'isolement* : transformateur tel que  $m = 1$ . Utilisé pour assurer une isolation galvanique entre circuits, ou encore adapter le régime de neutre (schéma de mise à la terre) aux besoins de l'installation. Exemple : IT  $\rightarrow$  TN-S



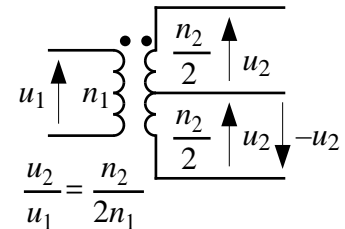
- *Transformateur à écran* : transformateur d'isolement incluant un écran électrostatique (utilisation : CEM)



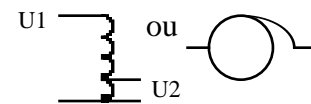
- *Transformateur de sécurité* : transformateur à écran à isolation renforcée (utilisation : CEM et sécurité électrique)



- *Transformateur à point milieu* : transformateur dont le primaire ou le secondaire possède une borne de connexion supplémentaire au milieu de l'enroulement. Permet un schéma symétrique



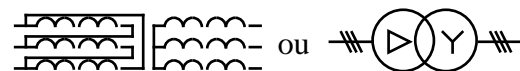
- *Autotransformateur* : transformateur simplifié à un seul enroulement. Ne permet pas l'isolation galvanique, mais autorise un réglage fin de la tension secondaire par déplacement du curseur servant de connexion de sortie sur l'enroulement.



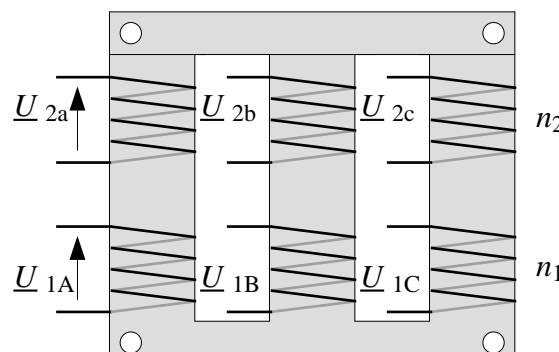
### Transformateurs triphasés

Le circuit magnétique d'un transformateur triphasé est de forme identique à celui d'un transformateur monophasé, mais reçoit une paire d'enroulements primaire/secondaire sur chaque "barre" du "E".

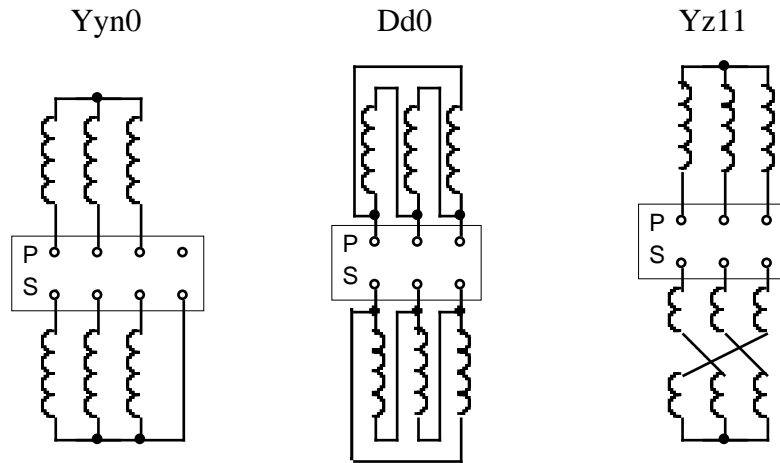
Symbole (cas d'un couplage étoile-triangle) :



Constitution :



Couplages :



Nomenclature :

1ère lettre (majuscule) couplage primaire	Y	couplage étoile
	D	couplage triangle
	Z	couplage zig-zag (nécessite des enroulements à point milieu)
2ème lettre (minuscule) couplage secondaire	y, d ou z	idem
3ème lettre	N ou n	neutre sorti
Indice horaire	0, 1, 2, ..., 11	retard de la BT sur la HT exprimé en multiple de 30°

Exemple : un indice horaire de 11 correspond à un retard de  $11 \times 30^\circ = 330^\circ$

Caractéristiques :

Couplage	Rapport de transformation
Yy	$m = \frac{n_2}{n_1}$
Yd	$m = \frac{\sqrt{3} n_2}{3 n_1}$
Yz	$m = \frac{\sqrt{3} n_2}{2 n_1}$
Dy	$m = \sqrt{3} \frac{n_2}{n_1}$
Dd	$m = \frac{n_2}{n_1}$

Plaque signalétique :

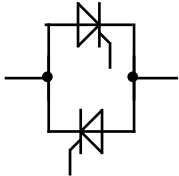
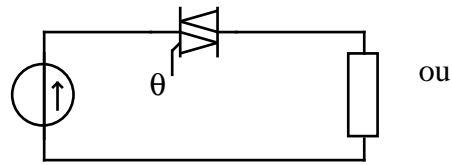
Type XXXXX		
KVA	0,8	puissance apparente
Ph	1	mono ou triphasé
P	230	tension primaire
S	48	tension secondaire
Hz	50-60	fréquence
IP	22	indice de protection
CI	F	classe d'isolation thermique
S fus	32A gG	fusible au secondaire

Usages les plus fréquents des transformateurs BT :

- modifier le schéma de liaison à la terre (régime de neutre)
- atténuer les perturbations (CEM, harmoniques...) et y remédier
- assurer la sécurité et la commande en 24 et 48V
- adapter la tension

**Gradateurs**

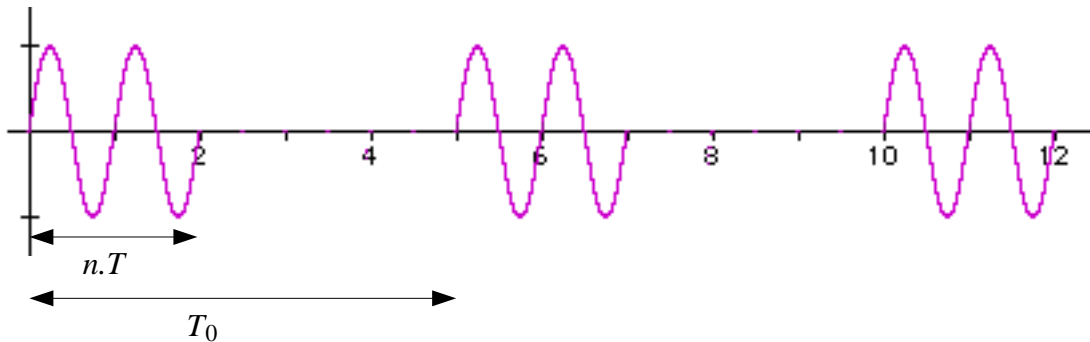
Schéma (cas d'une charge purement résistive) :



Les angles de commande du triac sont  $\theta$  et  $\theta + \pi$ .

Remarque : le triac peut être remplacé par deux thyristors tête-bêche, dont les gachettes sont commandées respectivement aux angles  $\theta$  et  $\theta + \pi$ .

• **Commande par train d'ondes :**

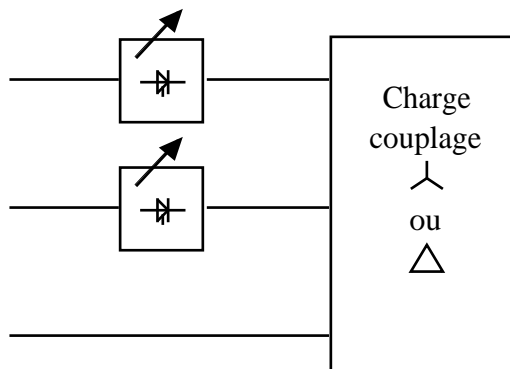


Le dispositif de commande du triac qui élabore les impulsions envoyées sur la gachette est synchronisé sur le zéro secteur : le triac ne devient passant qu'au moment où la sinusoïde du réseau passe par 0. Ceci permet d'éliminer les risques de perturbations électromagnétiques dues au découpage de la tension secteur.

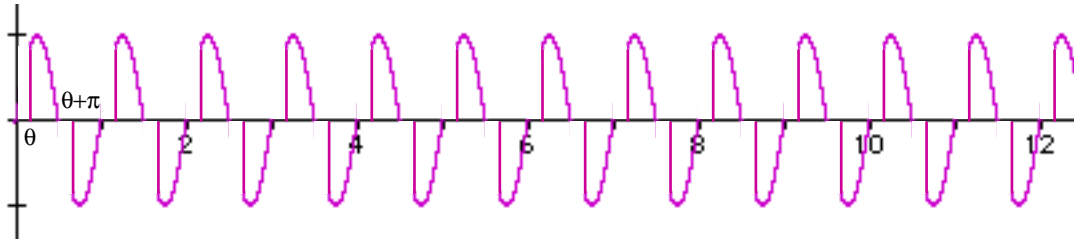
La durée du train d'ondes est  $n$  périodes secteurs  $T$ . Soit  $T_0$  la durée totale du cycle de commande. Le rapport cyclique est :  $\alpha = \frac{nT}{T_0}$  (ici  $\alpha = 2/5$ ). La valeur efficace de la tension est :

$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \sqrt{\alpha}$ , et pour une puissance installée  $P_0$  du récepteur, la puissance moyenne fournie vaut :  $P = \alpha.P_0$

En triphasé, deux unités de puissance commandées par deux gradateurs suffisent :



• **Commande par angle de phase :**



Sur charge résistive, la valeur efficace de la tension commandée est :

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\theta}{\pi} + \frac{\sin 2\theta}{2\pi}}$$

Le courant débité par la source est alternatif mais non sinusoïdal. Il peut être décomposé en un fondamental (à la fréquence du réseau) et des composantes harmoniques de fréquence multiple. La puissance apparente fournie par le réseau est telle que :

$$S_{\text{reseau}}^2 = P^2 + Q_{\text{reactif}}^2 + D_H^2$$

où : P : puissance active consommée par la charge

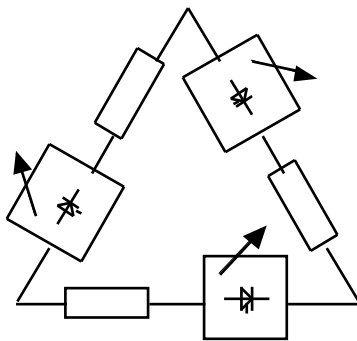
Q : puissance réactive dans la charge, à la fréquence du fondamental (fréquence réseau), mesurable par un varmètre.

D<sub>H</sub> : puissance "déformante" due à la présence des harmoniques, mesurable à l'aide d'un analyseur de spectre.

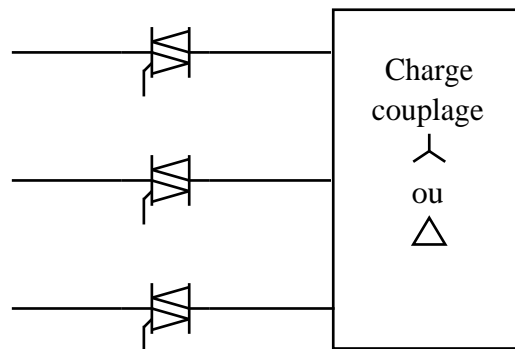
On définit le facteur de puissance comme d'habitude : f = P/S.

Gradateurs triphasé :

groupement triangle de 3 gradateurs monophasés :



montage gradateur triphasé :



Remarque : on démontre que les harmoniques de rang 3 et multiples de 3 disparaissent.