

# Le régime triphasé équilibré

## I. Présentation

Jusqu'ici nous avons étudié une tension alternative disponible entre deux bornes seulement, une telle tension est dite "monophasée". Les avantages du triphasé apparaîtront au fur et à mesure de l'étude des machines, dès maintenant retenons que, par rapport au monophasé :

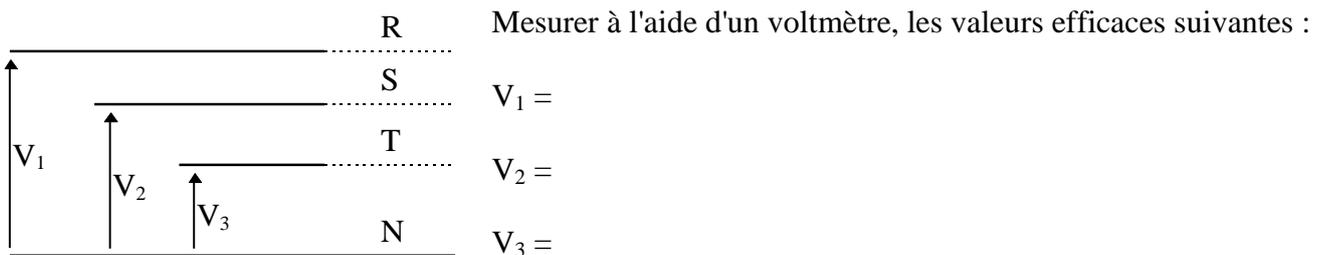
- Un alternateur triphasé a une puissance supérieure de 50 % environ à celle d'un alternateur monophasé de même volume et de même prix.
- La même énergie est transportée avec trois fils (sans neutre) alors qu'il en faut six identiques en monophasé (ou deux de section triple).
- Le moteur asynchrone triphasé, qui est le moteur le plus répandu, n'a pas d'équivalent en monophasé ou en continu.
- La tension obtenue après redressement est beaucoup moins ondulée.

Dès que la puissance fournie dépasse 10 KW, les installations sont alimentées en triphasé quatre fils (1,2,3) ou (R,S,T) et le neutre.

## II. Etude des tensions

### A. Tension simple

On appelle tension simple ou tension étoilée, la tension entre un fil de phase et le neutre.



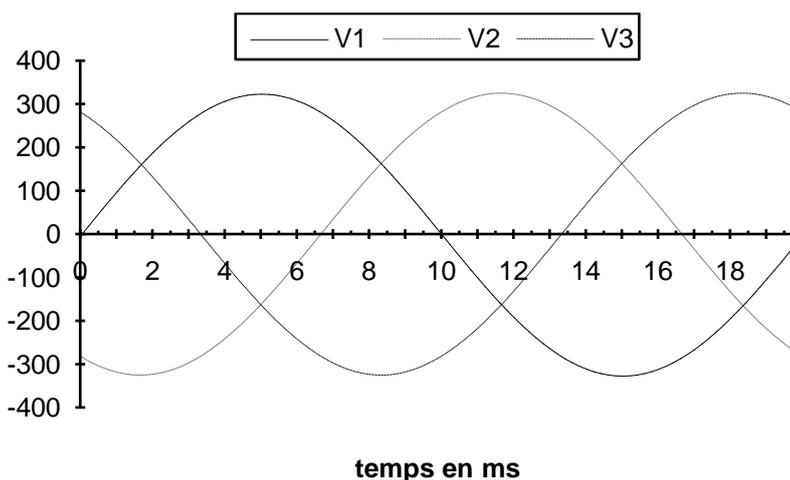
L'observation à l'oscilloscope montre que ces trois tensions sinusoïdales sont de même fréquence, ont même amplitude (donc même valeur efficace) et sont déphasées l'une par rapport à l'autre de  $120^\circ$  ou  $2\pi/3$  rad. Le système est alors dit équilibré.

Les équations horaires d'un système triphasé équilibré ont pour forme :

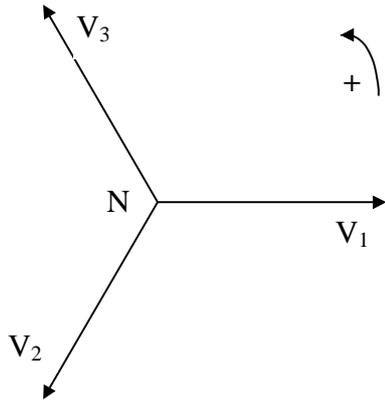
$$V_1(t) = \sqrt{2}.V.\sin(\omega.t) =$$

$$V_2(t) = \sqrt{2}.V.\sin\left(\omega.t - \frac{2.\pi}{3}\right) =$$

$$V_3(t) = \sqrt{2}.V.\sin\left(\omega.t - \frac{4.\pi}{3}\right) =$$

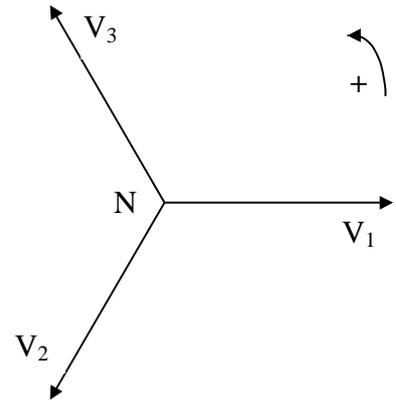


On associe à chacune de ces grandeurs un vecteur de Fresnel associé :



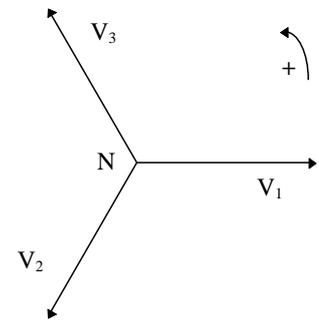
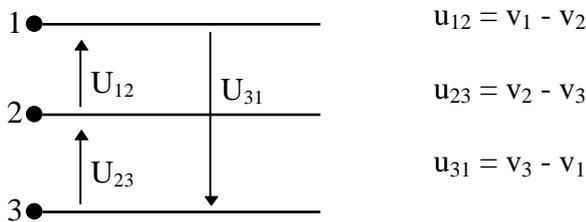
Construire :

$$V_1 + V_2 + V_3$$



### B. Tension composée

La tension composée est la tension entre 2 phases, on la note U.



En déduire les vecteurs de Fresnels associés.

Peut-on calculer directement la valeur efficace U de la tension composée à partir des relations précédentes ?

On se propose de construire les vecteurs de Fresnel des tensions composées du système triphasé étudié (échelle : 1 cm ↔ 20 V).

Représenter les vecteurs tensions simples et tensions composées.

En déduire les équations horaires de  $u_{12}$ ,  $u_{23}$  et  $u_{31}$

### C. Relation entre U et V

Représenter les vecteurs  $V_1$  et  $U_{12}$ .

Mesurer l'angle ( $V_1, U_{12}$ ).

En déduire une relation entre U et V.

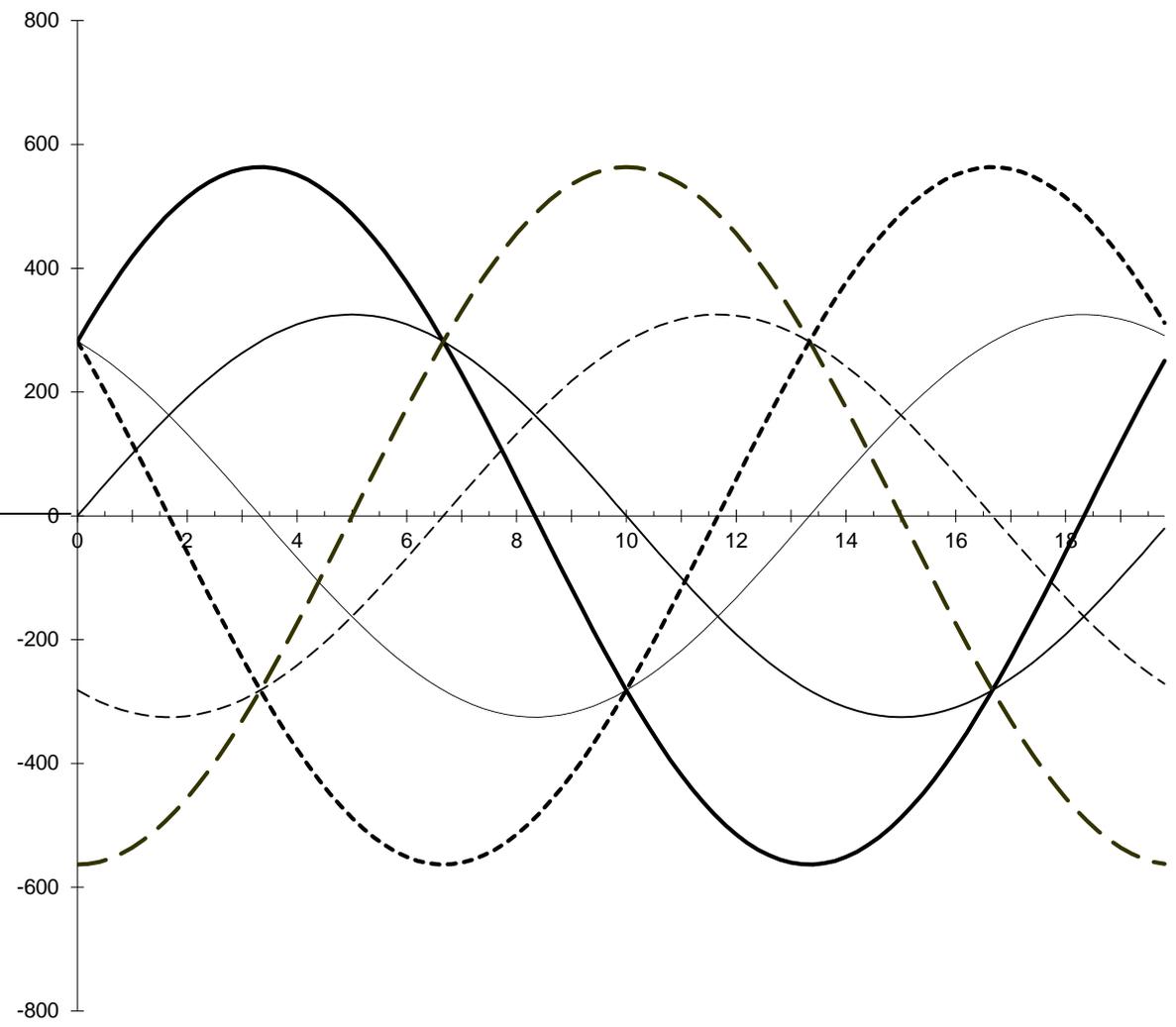
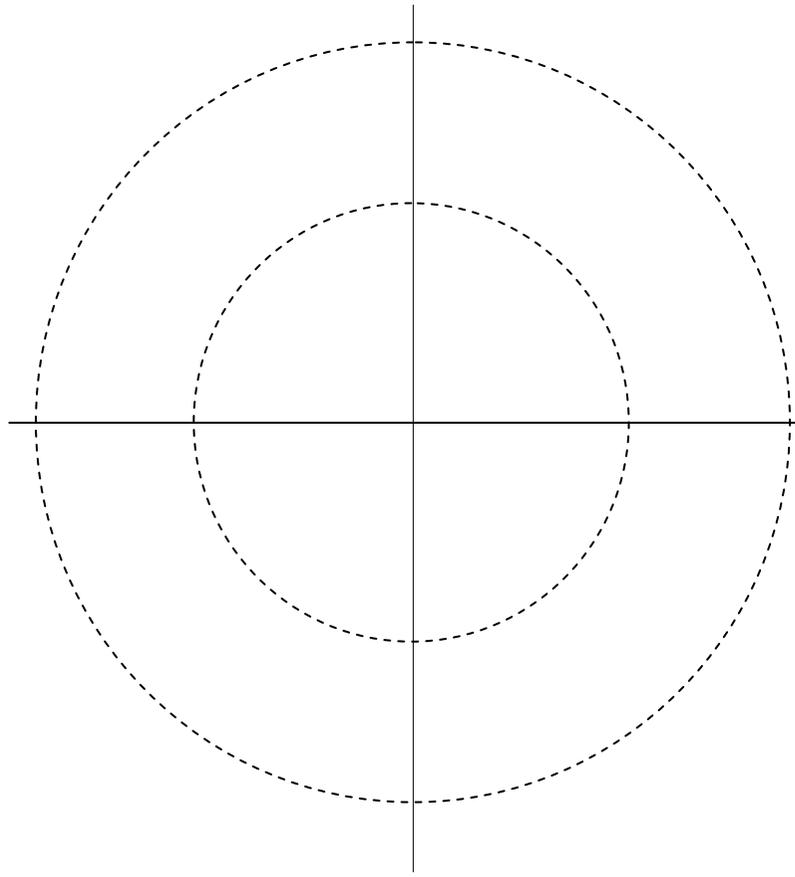
Quelle serait la tension composée si

$$V = 230 \text{ V}$$

$$U =$$

$$V = 400 \text{ V}$$

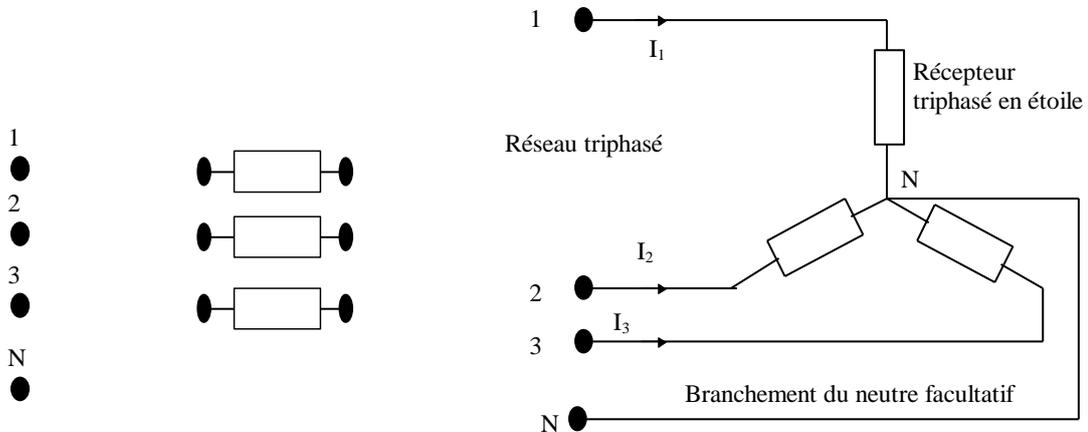
$$U =$$



### III. Récepteurs triphasés équilibrés

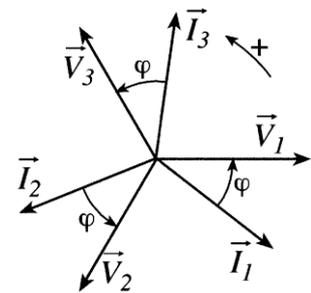
Trois récepteurs constituent un récepteur triphasé équilibré s'ils ont la même impédance  $Z$ .

#### A. Couplage étoile :



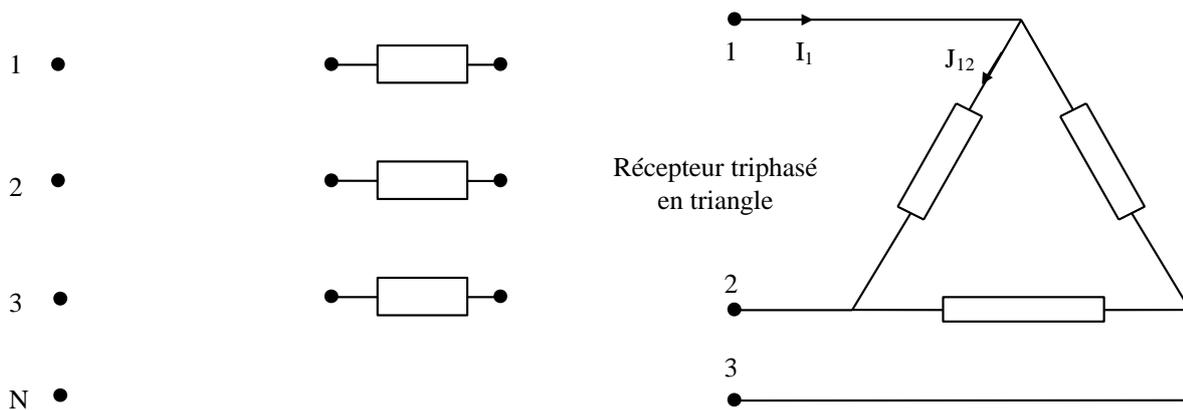
Chaque récepteur est soumis à une tension simple  $V$  et est traversé par un courant de ligne  $I$ .

Le diagramme de Fresnel de  $V_1, V_2$  et  $V_3$  ; puis des courants  $I_1, I_2$  et  $I_3$  se représente comme sur la figure ci-contre.



Chaque impédance  $Z$  du récepteur introduit un déphasage  $\varphi$  entre  $I$  et  $V$ .

#### B. Couplage triangle



Chaque récepteur est soumis à une tension composée  $U$  et est traversé par un courant de phase  $J$ .

Chaque impédance  $Z$  du récepteur introduit un déphasage  $\varphi$  entre  $J$  et  $U$ .

$I$  et  $J$  sont liés par la relation suivante :

Compléter VIII Résumé de cours page 8 puis faire les exercices 1 à 3.

#### IV. Puissances consommées par le groupement

Théorème de Boucherot : « Les puissances actives et réactives absorbées par un groupement de dipôles sont respectivement égales à la somme des puissances actives et réactives absorbées par chaque élément du groupement. »

$$\text{Puissance active : } P = P_1 + P_2 + P_3$$

or  $P_1 = P_2 = P_3$  car le récepteur est équilibré.

$$\text{Puissance réactive : } Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

or  $Q_1 = Q_2 = Q_3$  car le récepteur est équilibré.

$$\text{Puissance apparente : } S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$\text{Facteur de puissance : } k = \frac{P}{S}$$

##### A. Groupement étoile

Chaque phase du récepteur est soumise à une tension simple  $V$  et traversée par le courant de ligne  $I$ .

$$P_1 = P_2 = P_3 = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad \text{avec } \varphi = (I, V)$$

$$P =$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 =$$

$$Q =$$

##### B. Groupement en triangle

Chaque phase du récepteur est soumise à une tension composée  $U$  et traversée par le courant par phase  $J$ .

$$P_1 = P_2 = P_3 = \quad \text{avec } \varphi = (J, U)$$

$$P =$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 =$$

$$Q =$$

##### C. Conclusion

Quel que soit le couplage, étoile ou triangle, les puissances se calculent en appliquant les formules suivantes

$P =$	en W
$Q =$	en VAR
$S =$	en VA

$$U = \sqrt{3} V$$

$$I = \sqrt{3} J$$

$$\varphi = (I, V) = (J, U)$$

## V. Mesure des puissances au wattmètre

### A. Wattmètre triphasé

Il permet de mesurer directement la puissance active  $P$  en une seule lecture que le réseau soit à 3 ou 4 fils.

### B. Wattmètre monophasé sur ligne à 4 fils

Le Wattmètre est traversé par le courant en ligne  $i_1$  et soumis à la tension simple  $v_1$ . La puissance lue par l'appareil est :

$L =$

Donc la puissance active  $P$  consommée par le récepteur vaut :

$P =$

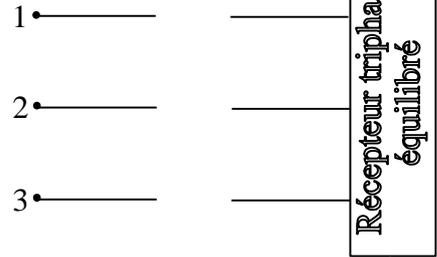
### C. Ligne à 3 fils : méthode des 2 wattmètres

$W_1$  est traversé par  $\vec{I}_1$  et  $\vec{U}_{13} = \vec{V}_1 - \vec{V}_3 \rightarrow L_1 = \vec{U}_{13} \cdot \vec{I}_1$

$W_2$  est traversé par  $\vec{I}_2$  et  $\vec{U}_{23} = \vec{V}_2 - \vec{V}_3 \rightarrow L_2 = \vec{U}_{23} \cdot \vec{I}_2$

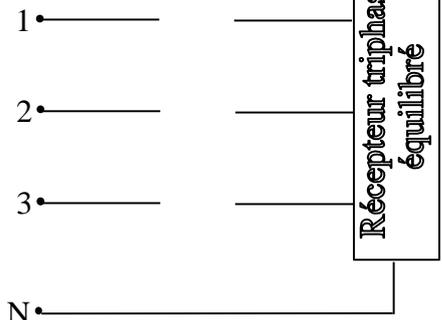
$L_1 + L_2 =$

A. Wattmètre triphasé

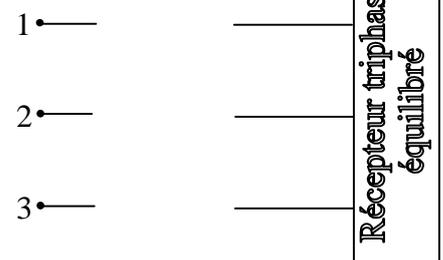


N. Facultatif

B. Ligne à 4 fils



C. Méthode des 2 wattmètres



La puissance active  $P$  consommée par le récepteur est (même en régime déséquilibré) :

$P =$

Dans le cas d'un récepteur équilibré, on peut aussi calculer :

$Q =$

## VI. Calcul des pertes par effet Joule

Chaque phase d'un récepteur présente une résistance  $r$  à l'origine d'une dissipation thermique.

Si on connaît  $r$ , alors :

$P_J = 3rI^2$  en étoile et  $P_J = 3rJ^2$  en triangle.

Souvent on n'a pas accès à  $r$ .

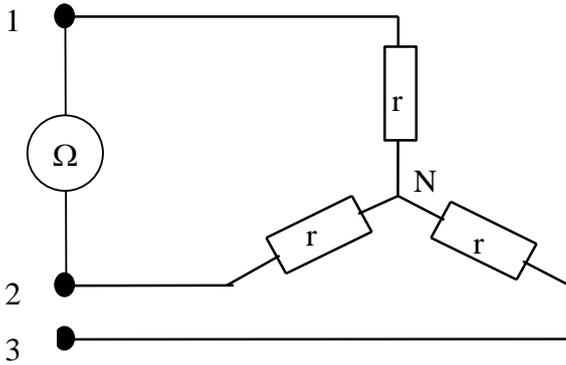
Si l'on branche un Ohmmètre entre deux bornes du récepteur (en dehors du neutre), il indique une résistance *apparente* que l'on nomme  $R_a$  (qui est fonction de  $r$  mais qui dépend du couplage...).

On a alors :

quelque soit le couplage.

Démonstration :

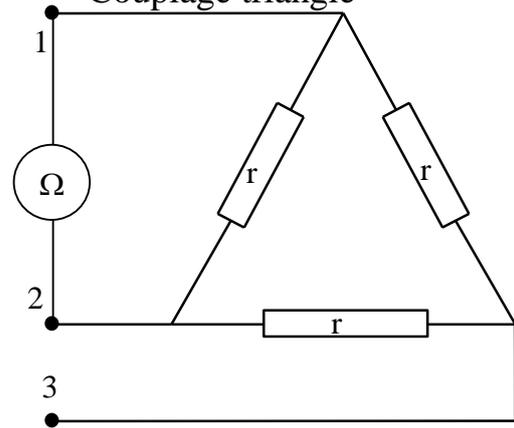
Couplage étoile



Ra =

d'où :  $P_j =$

Couplage triangle



Ra =

d'où :  $P_j =$

### VII. Relèvement du facteur de puissance

Soit un condensateur de capacité, en farads, soumis à une tension sinusoïdale de valeur efficace U, et de fréquence f, on a :

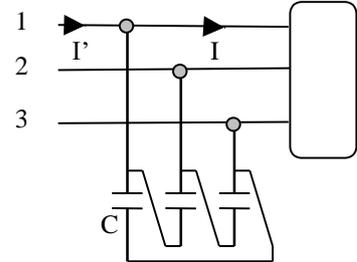
- sa puissance active absorbée est nulle  
 $P_{1C} = 0W$
- sa puissance réactive absorbée est négative :  
 $Q_{1c} = -C\omega U^2$

En ajoutant trois condensateurs identiques de capacité C, couplés en triangle à une installation triphasé, on diminue l'intensité en ligne :

$$I' < I$$

Le nouveau facteur de puissance de l'installation,  $\cos \varphi'$ , est alors augmenté. En général on se fixe un facteur de puissance de 0,93 pour être aux normes EDF. Il faut choisir les condensateurs tels que :

Réseau EDF 50 Hz



$$C_{\Delta} = \frac{P (\tan \varphi - \tan \varphi')}{3 \omega U^2}$$

(couplage triangle, tension composée)

$$C_Y = \frac{P (\tan \varphi - \tan \varphi')}{3 \omega V^2}$$

(couplage étoile, tension simple)

$\cos \varphi$  : facteur de puissance sans condensateur

$\varphi$  : déphasage sans condensateur

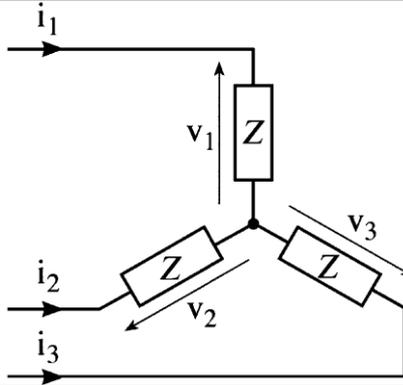
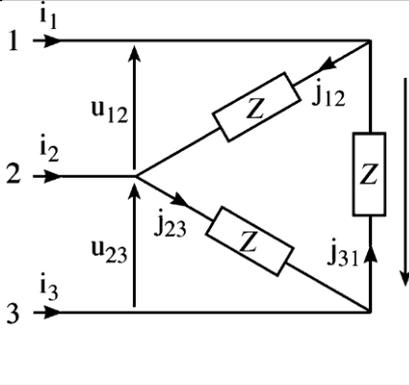
$\cos \varphi'$  : facteur de puissance après relèvement...

$\varphi'$  : déphasage après relèvement...

P : puissance absorbée par l'ensemble de l'installation (les condensateurs ne modifient pas P)

VIII. Résumé de cours

QCM triphasé

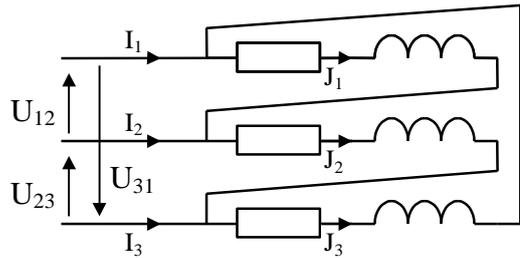
<b>Montage</b>		
<i>Relation entre U et V</i>	$V =$	$U =$
<i>Relation entre I et J</i>	$I =$	$I =$
<i>Relation avec l'impédance d'une phase Z</i>	$V =$	$U =$
<i>Déphasage</i>	$\varphi =$	$\varphi =$
<i>Puissance active</i>	$P =$	$P =$
	$P =$	
<i>Pertes Joules</i> <i>Soit r, la résistance d'un enroulement, R<sub>a</sub> la résistance entre phase.</i>	$R_a =$	$R_a =$
	$P_j =$	$P_j =$
<i>Puissance réactive</i>	$Q =$	$Q =$
	$Q =$	
<i>Puissance apparente</i>	$S =$	$S =$
	$S =$	
<i>Relèvement du facteur de puissance à l'aide de 3 C</i>	$C_Y =$	$C_{\Delta} =$

**Exercice 1 :** Etude d'un récepteur triangle

Soit le schéma suivant :

$R = 10 \Omega \quad L = 10 \text{ mH} \quad U = 400 \text{ V}$

- a) Calculer l'impédance complexe d'une phase du récepteur.
- b) Calculer la valeur efficace du courant de phase J
- c) En déduire la valeur efficace du courant de ligne I



**Exercice 2 :** Etude d'un récepteur en étoile, régime déséquilibré

Sur le secteur 230/400 V, on place deux lampes {150 W; 220 V} en parallèle entre chaque fil de phase et le neutre. [Simulation](#)

- a. Calculer l'intensité du courant dans chacun des fils de ligne. Quel est l'intensité du courant dans le neutre ?
- b. On éteint une lampe de la phase 2 et les deux lampes de la phase 3. Calculer l'intensité du courant dans chaque fil de phase et dans le fil neutre

**Exercice 3 :** Etude d'un récepteur en étoile, régime déséquilibré

Sur le secteur 230/400 V (50 Hz) on monte en étoile (avec neutre) trois récepteurs :

entre 1 et N :	$Z_1 = 55 \Omega$	$\cos \varphi_1 = 0,8$ (inductif)	$\varphi_1 =$	$\mathbf{V}_1 = [230\text{V} ; 0^\circ]$
entre 2 et N :	$Z_2 = 44 \Omega$	$\cos \varphi_2 = 1$	$\varphi_2 =$	$\mathbf{V}_2 = [230\text{V} ; -120^\circ]$
entre 3 et N :	$Z_3 = 110 \Omega$	$\cos \varphi_3 = 0$ (capacitif)	$\varphi_3 =$	$\mathbf{V}_3 = [230\text{V} ; 120^\circ]$

- a. Calculer l'intensité complexe du courant qui traverse chacun des récepteurs.
- b. Déterminer l'intensité du courant dans le neutre. [Simulation](#).
- c. Si on ne relie pas le neutre du récepteur (N') au neutre du réseau, donner l'expression de  $\mathbf{V}_{N'}$ .

**Exercice 4 :** Application du théorème de Boucherot en triphasé

Une installation triphasée est alimentée par un réseau 230 V / 400 V , 50 Hz.

Afin d'augmenter le facteur de puissance de l'installation on ajoute une batterie de condensateurs (installation bis).

Compléter le tableau suivant :

	P en W	Q (Var)	S (VA)	cos φ	I (A)
Moteur 1	3000				7,2
Moteur 2		2400		0,8	
Installation					
Condensateurs			2000		
Installation bis					

### Exercice 5 : Etude d'une installation industrielle :

Une installation triphasé équilibré 230 V / 400 V 50 Hz comporte :

- 1 moteur  $M_1$  triphasé :  $P_1 = 3,0 \text{ kW}$   $k_1 = 0,70$   $Q_1 =$
- 1 moteur  $M_2$  triphasé :  $P_2 = 5,0 \text{ kW}$   $k_2 = 0,75$   $Q_2 =$
- 3 moteurs  $M_3$  monophasé 230 V:  $P_3 = 2,0 \text{ kW}$   $k_3 = 0,80$   $Q_3 =$
- 3 moteurs  $M_4$  monophasé 400 V:  $P_4 = 2,0 \text{ kW}$   $k_4 = 0,80$   $Q_4 =$
- 6 lampes 230 V  $P_L = 200 \text{ W}$

1. Faire un schéma détaillé de l'installation
2. Pour le fonctionnement nominal de tous les appareils, calculer :
  - a. P, Q, S de l'installation totale.
  - b. Le courant en ligne I
  - c. Le facteur de puissance de l'installation k

EDF facture aux clients industriels l'énergie réactive consommée lorsque  $k < 0,93$  car cela entraîne des pertes en ligne supplémentaires et un sur dimensionnement du réseau qui n'est pas pris en compte par la facturation de l'énergie active. Aussi les clients industriels installent près des machines consommatrices d'énergie réactives des batteries de condensateur afin de relever le facteur de puissance.

3. On souhaite remonter le facteur de puissance  $k'$  à 0,93
  - a. Calculer l'énergie réactive que doivent fournir les condensateurs.
  - b. Les condensateurs sont en groupement étoile. Calculer C.
  - c. Calculer le nouveau courant en ligne I'.

### Exercice 6 : chute de tension en ligne

Une usine est alimentée par un réseau moyenne tension. Elle consomme  $P = 4000 \text{ kW}$  et  $Q = 2000 \text{ kVAR}$ . La tension entre phase à l'entrée de l'usine est  $U = 18,5 \text{ kV}$ . L'usine est assimilable à un récepteur triphasé équilibré.

1. Quel est le facteur de puissance de l'usine ?
2. Quelle est l'intensité en ligne ?

Chaque fil de ligne alimentant l'usine est assimilable à un dipôle inductif ( $r = 2 \Omega$ ,  $l\omega = 2 \Omega$ )

3. Calculer les puissances  $P_L$  et  $Q_L$  consommées par la ligne.
4. Calculer les puissances  $P_T$  et  $Q_T$  consommées par l'ensemble "ligne-usine". En déduire  $k_T$ .
5. Quelle est la tension  $U'$  en début de ligne. En déduire la chute de tension  $\Delta U = U' - U$

### Exercice 7 : méthode des deux wattmètres (à connaître...)

Sur un réseau triphasé équilibré direct, sans neutre (230/400 V ; 50 Hz), sont branchées en étoile trois bobines identiques. Pour chaque bobine :  $R = 10 \Omega$  et  $L = 0,1 \text{ H}$ .

1. Calculer l'impédance complexe de chaque bobine. En déduire les courants en ligne.
2. Déterminer pour le groupement les puissances et le facteur de puissance.

On mesure la puissance consommée par la méthode des deux wattmètres. On rappelle que pour un récepteur équilibré la puissance réactive peut être déterminée par la relation :

$$Q = \sqrt{3} (L_1 - L_2)$$
3. Donner le schéma de principe de cette méthode.
4. Comment choisir les calibres de ces wattmètres ? Calculer les indications des deux wattmètres
5. Déterminer la capacité des trois condensateurs qui couplés en triangle permettraient de relever le facteur de puissance à 0,9. Calculer le nouveau courant de ligne.