

La distribution triphasée, conçue par Tesla en 1888 et déployée dès 1891 en Allemagne par Oskar von Miller et Michael von Dolivo-Dobrowolsky, assure une puissance stable, réduit les pertes et améliore l'efficacité pour les industries. Standardisée à 50 Hz en Europe et 60 Hz aux USA, elle domine en Afrique à 50 Hz, sauf au Liberia et dans certaines régions du Nigeria où le 60 Hz est adopté. Elle reste cruciale pour les grands consommateurs d'énergie.

Production et transport de l'énergie électrique

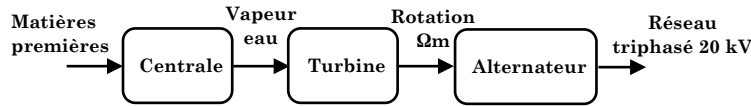
1- Production de l'énergie électrique

La production d'électricité convertit des sources primaires (charbon, gaz, eau, vent, soleil) en énergie électrique via turbines et alternateurs, transformant l'énergie mécanique en électricité stable et fiable.

On distingue les centrales de production :

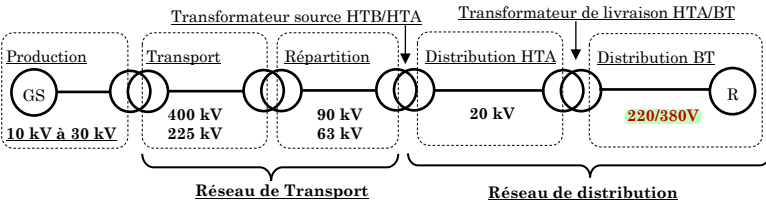
- Centrale hydraulique
- Centrale nucléaire
- Centrale thermique
- Centrale solaire
- Centrale éolienne ...etc.

La majorité des centrales de production de l'électricité est basé sur le schéma suivant :



2- Transport en triphasé de l'énergie électrique

Le transport électrique achemine l'énergie des centrales aux réseaux via des lignes haute tension, réduisant les pertes et assurant une distribution efficace et fiable pour répondre aux besoins des consommateurs.



Niveaux des tensions de domaine électriques :

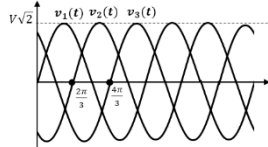
Domaine de Haute tension	
Haute tension B (HTB)	Plus de 50 kV
Haute tension A (HTA)	Entre 1kV et 50 kV
Domaine de basse tension	
Basse tension B (BTB)	Entre 500V et 1kV
Basse tension A (BTA)	Entre 50V et 500V

Distribution en triphasé de l'énergie électrique

1- Définition

Un système triphasé équilibré est caractérisé par 3 tensions de :

- Même valeur efficace
- Même fréquence
- Déphasées l'une par rapport à l'autre par une phase 120°.



Où :

$$v_1(t) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t) , v_2(t) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) , v_3(t) = V\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3})$$

2- Constitution

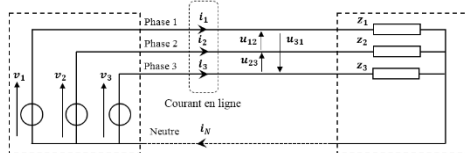
• Tensions simples :

$$v_1, v_2, v_3$$

• Tensions composées

- $u_{12} = v_1 - v_2$
- $u_{23} = v_2 - v_3$
- $u_{31} = v_3 - v_1$

• La tension de neutre : $v_N = 0$

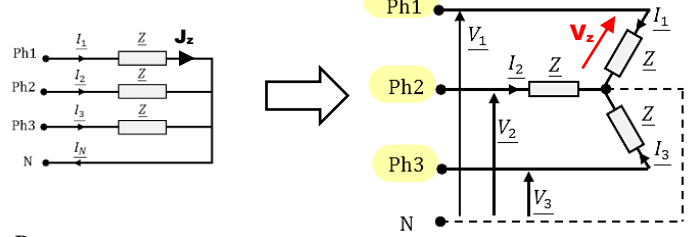


Réseau Maroc ONE : 220 /380 → V = 220 V et U = 380V

Avec : V tension simple et U la tension composée ;

3- Couplage en ETOILE (Y)

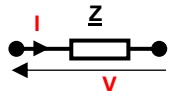
Un récepteur triphasé équilibré couplé en étoile correspond aux représentations suivantes :



○ Remarques :

➤ La tension aux bornes d'une impédance Z : $V_z = V$, c'est la tension simple.

➤ Le courant qui traverse une impédance Z : $J = I$, c'est le courant de ligne.



○ Relations : $U = \sqrt{3} V$ et $I = J$

- Charge équilibrée : $v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) = 0$ et $i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0$

○ Les puissances : active Pz, réactive Qz :

Puissance active Pz	Puissance réactive Qz
$P_z = 3 Z \cdot I^2 \cdot \cos(\varphi)$	$Q_z = 3 Z \cdot I^2 \cdot \sin(\varphi)$
$P_z = 3 \frac{V^2}{ Z } \cdot \cos(\varphi)$	$Q_z = 3 \frac{V^2}{ Z } \cdot \sin(\varphi)$

3.1- Résistance R : |Z| = R et φ = 0

Puissance active PR	Puissance réactive QR
$P_R = 3 \cdot R \cdot I^2$	$Q_R = 0$
$P_R = 3 \frac{V^2}{R}$	

3.2 - Inductance L : |Z| = L.ω et φ = π/2

Puissance active PL	Puissance réactive QL
$P_L = 0$	$Q_L = 3 \cdot L \cdot \omega \cdot I^2$
	$Q_L = 3 \frac{V^2}{L \cdot \omega}$ Ou $Q_L = \frac{U^2}{L \cdot \omega}$

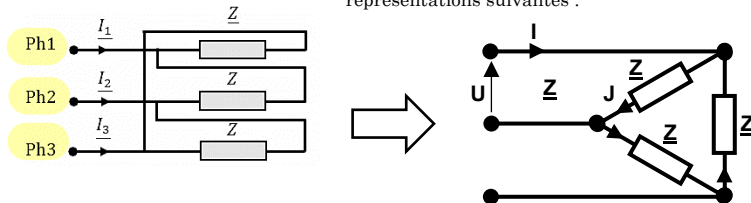
3.3 - Inductance C : |Z| = 1 / (c.ω) et φ = -π/2

Puissance active PC	Puissance réactive QC
$P_C = 0$	$Q_C = -3 \cdot \frac{I^2}{C \cdot \omega}$
	$Q_C = -3 \cdot C \cdot \omega \cdot V^2$ Ou $Q_C = -C \cdot \omega \cdot U^2$

4 - Couplage en TRIANGLE (Δ)

Utilisée dans le relèvement de facteur puissance

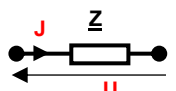
Un récepteur triphasé équilibré couplé en triangle correspond aux représentations suivantes :



○ Remarques :

➤ La tension aux bornes d'une impédance Z : $V_z = U$, c'est la tension Composée.

➤ Le courant qui traverse une impédance Z : J, c'est le courant de phase.



○ Relations : $I = \sqrt{3} J$ et $V_z = U$

- Charge équilibrée : $u_{12}(t) + u_{23}(t) + u_{31}(t) = 0$ et $j_1(t) + j_2(t) + j_3(t) = 0$

Les puissances : active P_z , réactive Q_z :

Puissance active P_z	Puissance réactive Q_z
$P_z = 3 Z \cdot J^2 \cdot \cos(\varphi)$	$Q_z = 3 Z \cdot J^2 \cdot \sin(\varphi)$
$P_z = 3 \frac{U^2}{ Z } \cdot \cos(\varphi)$	$Q_z = 3 \frac{U^2}{ Z } \cdot \sin(\varphi)$

3.1 - Résistance R : $|Z| = R$ et $\varphi = 0$

Puissance active P_R	Puissance réactive Q_R
$P_R = 3 \cdot R \cdot J^2$ Ou $P_R = R \cdot I^2$	$Q_R = 0$
$P_R = 3 \frac{U^2}{R}$	

3.2 - Inductance L : $|Z| = L \cdot \omega$ et $\varphi = \pi/2$

Puissance active P_L	Puissance réactive Q_L
$P_L = 0$	$Q_L = 3 \cdot L \cdot \omega \cdot J^2$ ou $Q_L = L \cdot \omega \cdot I^2$
	$Q_L = 3 \frac{U^2}{L \cdot \omega}$

3.3 - Inductance C : $|Z| = \frac{1}{C \cdot \omega}$ et $\varphi = -\pi/2$

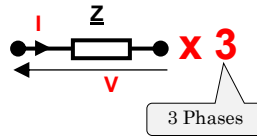
Puissance active P_C	Puissance réactive Q_C
$P_C = 0$	$Q_C = -3 \cdot \frac{J^2}{C \cdot \omega}$ Ou $Q_C = -\frac{I^2}{C \cdot \omega}$
	$Q_C = -3 \cdot C \cdot \omega \cdot U^2$

Utilisée dans le relèvement de facteur puissance

Puissances en régime triphasé

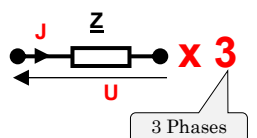
1- Couplage étoile (Y)

- Puissance active : $P_Y = 3 \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ (en W)
- Puissance réactive : $Q_Y = 3 \cdot V \cdot I \cdot \sin(\varphi)$ (en VAR)
- Puissance apparente : $S_Y = 3 \cdot V \cdot I$ (en VA)



2- Couplage étoile (Δ)

- Puissance active : $P_\Delta = 3 \cdot U \cdot J \cdot \cos(\varphi)$ (en W)
- Puissance réactive : $Q_\Delta = 3 \cdot U \cdot J \cdot \sin(\varphi)$ (en VAR)
- Puissance apparente : $S_\Delta = 3 \cdot U \cdot J$ (en VA)

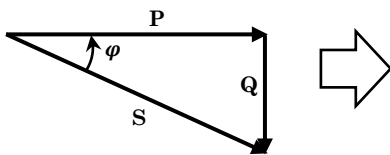


3- Quel que soit le couplage du récepteur

- Puissance active : $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$ (en W)
- Puissance réactive : $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin(\varphi)$ (en VAR)
- Puissance apparente : $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$ (en VA)

La relation le plus utilisé entre la puissance active et la puissance réactive

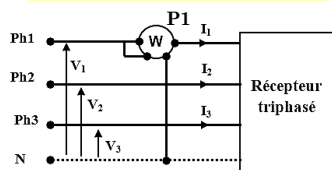
4- Triangle de puissances



- $\cos(\varphi) = \frac{P}{S}$
- $\sin(\varphi) = \frac{Q}{S}$
- $\tan(\varphi) = \frac{Q}{P} \Rightarrow Q = P \cdot \tan(\varphi)$
- $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

5- Mesure de puissance par wattmètre

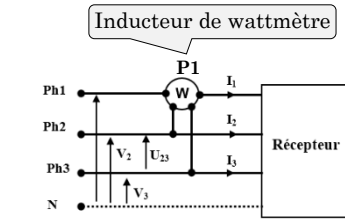
❖ Méthode d'un seul wattmètre



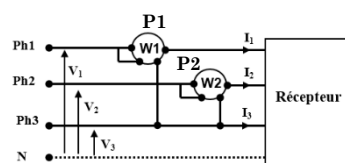
Puissance active : $P = 3 P1$

❖ Méthode de deux wattmètres

- Puissance active : $P = P1 + P2$
- Puissance réactive : $Q = \sqrt{3} (P1 - P2)$



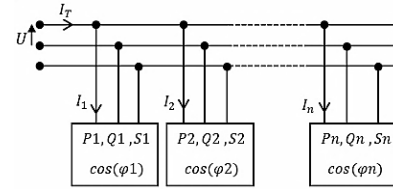
Puissance réactive : $Q = \sqrt{3} P1$



Notes : P1 et P2 sans unité

6- Théorème de Boucherot

La puissance active et réactive d'un système s'additionnent, mais la puissance apparente totale diffère, car elle dépend des vecteurs de ces puissances.



Puissance active totale	Puissance réactive totale	Puissance apparente totale
$P_T = P_1 + P_2 + \dots + P_n$	$Q_T = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$	$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2}$

Donc :

○ Le courant total de ligne $I_T : S_T = \sqrt{3} U \cdot I_T \Rightarrow I_T = \frac{S_T}{\sqrt{3} U}$

○ Le facteur de puissance de l'installation $f_{pT} = \cos(\varphi_T) : f_{pT} = \frac{P_T}{S_T}$

Efficacité électrique en régime alternatif sinusoïdal

1- Facteur de puissance

Le facteur de puissance évalue l'efficacité d'un circuit électrique, indiquant la part d'énergie utile par rapport à l'énergie totale, et impacte les pertes du système.

Il est exprimé par : $f_p = \frac{P}{S}$

Ce facteur est inférieur ou égal à 1.

- Un cas particulier : Dans régime alternatif sinusoïdal $f_p = \cos(\varphi)$

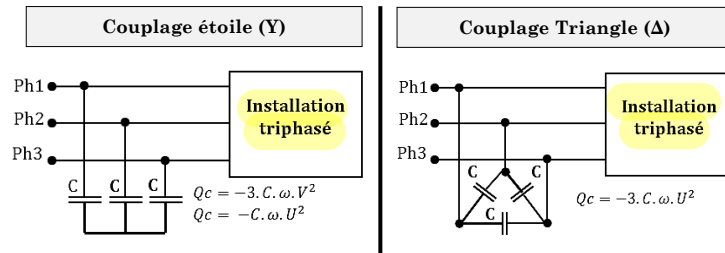
2- Effet de la chute de facteur de puissance

Effets de la chute du facteur de puissance dans les circuits électriques :

- Augmentation des pertes énergétiques dans les conducteurs.
- Surchauffe des équipements et des câbles.
- Réduction de la capacité du système de distribution.
- Augmentation des coûts d'exploitation.
- Diminution de l'efficacité globale du système électrique.
- Nécessité d'installations plus robustes et coûteuses.
- Baisse de la stabilité du réseau électrique.

3- Relèvement du facteur de puissance (solution)

Le fournisseur de l'électricité (ONE) impose donc un facteur de puissance minimal à respecter, faute de quoi l'entreprise est taxée pour toute consommation de puissance réactive excédentaire ou bien d'installer un compensateur électrique.



Remarque : Cahier des charges impose le facteur de puissance souhaité f_p'

D'après le théorème de Boucherot, la puissance réactive de compensation Q_c à installer est : $Q_c = Q_2 - Q_1$

Réseau $Q_2 = P \cdot \tan(\varphi_2)$ → Installation : $Q_1 = P \cdot \tan(\varphi_1)$

Condensateur (Y ou Δ) : $Q_c = Q_2 - Q_1$

Couple étoile : $Q_c = -C \cdot \omega \cdot U^2$

Couplage triangle : $Q_c = -3 \cdot C \cdot \omega \cdot U^2$

$C = P \cdot \frac{\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)}{\omega \cdot U^2}$

$C = P \cdot \frac{\tan(\varphi_1) - \tan(\varphi_2)}{3 \cdot \omega \cdot U^2}$

Bon choix : Le couplage en triangle (Δ) est privilégié, car il permet d'utiliser un condensateur de faible capacité, réduisant ainsi les coûts et évitant le surdimensionnement de l'installation.