

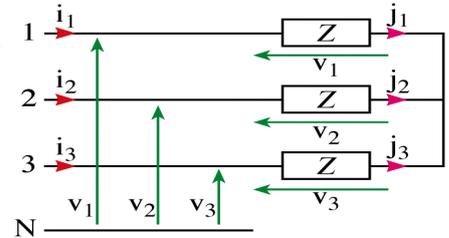
Le Transformateur Triphasé

1) Rappel sur les systèmes triphasés :

Définitions :

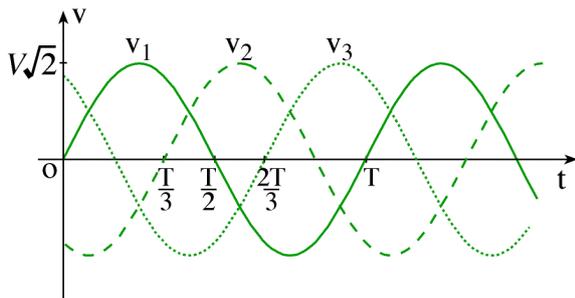
On appelle système polyphasé un ensemble de grandeurs de même nature (courant, tension) alternatives de même fréquence, rencontrés dans une même machine ou en un même point d'un circuit.

Ainsi les trois courants $i_1(t)$, $i_2(t)$, $i_3(t)$ passant dans les 3 conducteurs d'une ligne triphasée constitue un **système triphasé**.



Un système **triphasé de grandeurs sinusoïdales** est **équilibré** si ces 3 grandeurs ont **la même amplitude** et sont **régulièrement déphasées de $\frac{2\pi}{3} rad$ (120°)**.

$$v_1(t) = V_m \sin(\omega t) \quad v_2(t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad v_3(t) = V_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad \boxed{\forall t, v_1(t) + v_2(t) + v_3(t) = 0}$$



Oscillogrammes des tensions 3~

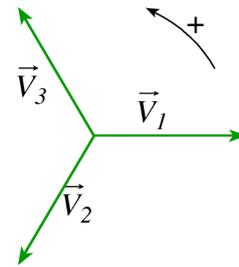


Diagramme de Fresnel des tensions 3~

Les tensions entre phase et neutre sont dites « **tensions simples** »

Les tensions entre deux phases sont dites « **tensions composées** »

$$u_{12}(t) = v_1(t) - v_2(t)$$

$$u_{23}(t) = v_2(t) - v_3(t)$$

$$u_{31}(t) = v_3(t) - v_1(t)$$

$$\boxed{\text{de même : } \forall t, u_{12}(t) + u_{23}(t) + u_{31}(t) = 0}$$

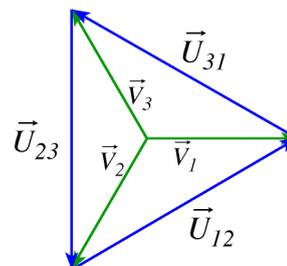
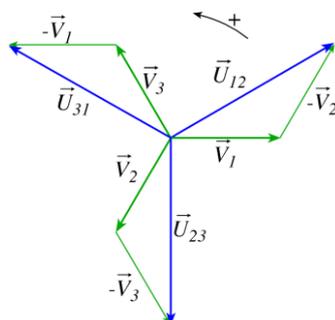


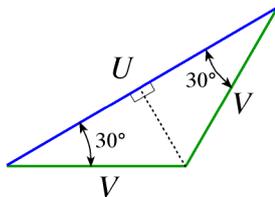
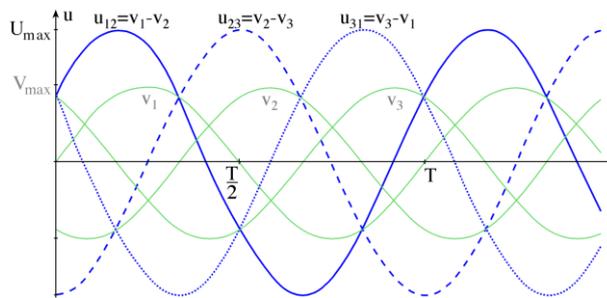
Diagramme de Fresnel des tensions Simples et des tensions composées

Équations horaires et oscillogrammes des tensions composées :

$$u_{12}(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6})$$

$$u_{23}(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$$

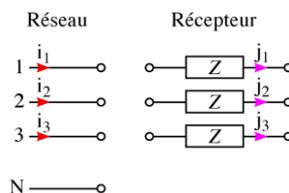
$$u_{31}(t) = U\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{7\pi}{6})$$



$$U = 2V \cos \frac{\pi}{6} \text{ soit } U = 2V \frac{\sqrt{3}}{2}$$

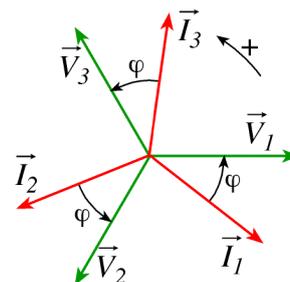
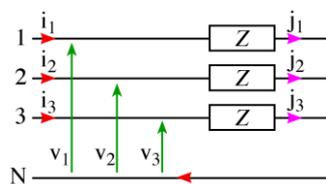
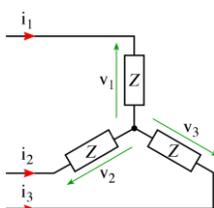
Enfinement : $\boxed{U = V\sqrt{3}}$ Cette relation est toujours vraie quelque soit la charge.

- Le système triphasé (g_1, g_2, g_3) est dit direct si g_2 est en retard d'un angle $\frac{2\pi}{3}$ sur g_1 qui est en retard d'un angle $\frac{2\pi}{3}$ sur g_3 . Autrement, le système est dit inverse.
- Un récepteur triphasé équilibré est récepteur constitué de trois dipôles identiques, d'impédances identiques ($\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_3$) c-a-d ils ont le même module et le même argument. Il peut être couplé soit en étoile soit en triangle.



Récepteur triphasé

Couplages de récepteurs triphasés :

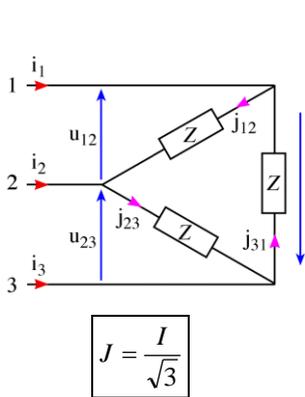


Récepteur triphasé couplé en étoile (Y)

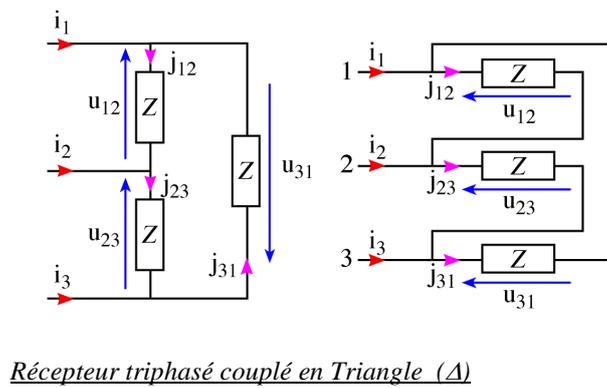
Loi des Nœuds : $i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = i_N(t)$ en complexe : $\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = \bar{I}_N$

Si le récepteur triphasé est équilibré, le courant dans la ligne neutre \bar{I}_N est NUL. Le fil neutre peut être supprimé sans modifier le fonctionnement de l'ensemble.

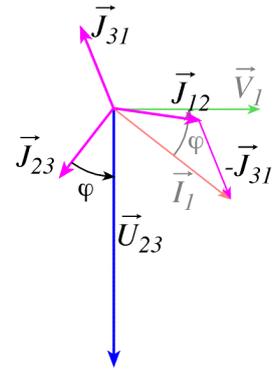
⚠ Mais en règle générale, on évite de supprimer la ligne neutre, surtout si le régime peut être déséquilibré (coupure de phase, fusion de fusible, charge déséquilibrée) pour éviter les surtensions et les baisses de tensions aux bornes des charges.



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



Récepteur triphasé couplé en Triangle (Δ)



Puissance en Triphasé :

	Couplage étoile	Couplage triangle
Tension entre phase	$U = V \cdot \sqrt{3}$	U
Courant en ligne	$I = J$	$I = J \sqrt{3}$
Déphasage	$\varphi (I, V)$	$\varphi (J, U)$
Puissance active	$P = 3 \cdot P_1 = 3VI \cos \varphi$ $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$	$P = 3 \cdot P_1 = 3UJ \cos \varphi$ $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$
Puissance réactive	$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$	$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$
Puissance apparente	$S = \sqrt{3}UI$	$S = \sqrt{3}UI$

Documentation du constructeur d'un transformateur triphasé :

transformateurs de distribution HTA/BT

transformateurs secs enrobés TRIHAL de 160 à 2500 kVA
 isolement ≤ 24 kV - tension secondaire 410 V - 50 Hz
 classe thermique F - ambiante $\leq 40^\circ$ C, altitude ≤ 1000 m



normes

Ces transformateurs sont conformes aux normes :

- NFC 52 100 (1990), harmonisée avec les documents d'harmonisation CENELEC HD 398-1 à 398-5 ;
- norme NF C 52115 (1994) harmonisée avec le document HD 538.1 S1 du CENELEC ;
- norme NF C 52726 (1993) harmonisée avec le document HD 464 S1 du CENELEC ;
- IEC 76-1 à 76-5 (1993) ;
- IEC 726 (édition 1982).



caractéristiques électriques

isolement 17,5 kV et 24 kV - tension secondaire 410 V

puissance assignée (kVA) ^{(1) (2)}	160	250	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	
tension primaire assignée ⁽¹⁾	15 kV, 20 kV et doubles tensions 15/20 kV (puissance conservée)										
niveau d'isolement assigné ⁽²⁾	17,5 kV pour 15 kV - 24 kV pour 20 kV										
tension secondaire à vide ⁽¹⁾	410 V entre phases, 237 V entre phase et neutre										
réglage (hors tension) ⁽¹⁾	$\pm 2,5$ % ⁽¹⁾										
couplage	Dyn 11 (triangle, étoile neutre sorti)										
pertes (W)	à vide	650	880	1200	1650	2000	2300	2800	3100	4000	5000
	à 75°C	2300	3300	4800	6800	8200	9600	11500	14000	17500	20000
dues à la charge	à 75°C	2700	3800	5500	7800	9400	11000	13100	16000	20000	23000
	à 120°C	2700	3800	5500	7800	9400	11000	13100	16000	20000	23000
tension de court-circuit (%)	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
courant à vide (%)	2,3	2	1,5	1,3	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1	
courant d'enclenchement	le/In valeur crête	10,5	10,5	10	10	10	10	10	10	9,5	9,5
	constante de temps	0,13	0,18	0,25	0,26	0,30	0,30	0,35	0,40	0,40	0,5
chute de tension à pleine charge (%)	cos $\phi = 1$ à 120°C	1,85	1,69	1,55	1,41	1,35	1,27	1,22	1,18	1,18	1,10
	cos $\phi = 0,8$ à 120°C	4,87	4,77	4,68	4,59	4,55	4,50	4,47	4,44	4,44	4,38
rendement (%)	charge 100 %	97,95	98,16	98,35	98,52	98,60	98,69	98,74	98,82	98,81	98,89
	charge 75%	97,79	98,03	98,24	98,43	98,50	98,61	98,66	98,76	98,75	98,82
bruit ⁽³⁾	puissance acoustique LWA	62	65	68	70	72	73	75	76	78	81
	pression acoustique LPA à 1 m	50	53	55	57	58	60	61	62	63	66
décharges partielles ⁽⁴⁾	≤ 10 pC à 1,1 Um										

(*) La puissance assignée est définie en refroidissement naturel dans l'air (ANI). Pour des contraintes particulières, elle peut être augmentée de 40 % par adjonction de ventilation forcée (AF). Nous consulter.

(1) Autres possibilités sur demande, nous consulter.

(2) Rappel sur les niveaux d'isolement :

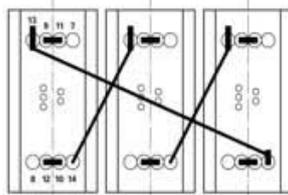
niveau d'isolement assigné (kV)	7,2	12	17,5	24
kV eff. 50 Hz - 1 mn	20	28	38	50
kV choc. 1,2/50 μ s	60	75	95	125

(3) Mesures selon CEI 551.

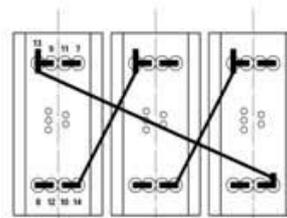
(4) Mesures selon CEI 270.

changement de tension par barrettes de couplage manœuvrables hors tension.

bitension primaire 15/20 kV



20 kV



15 kV

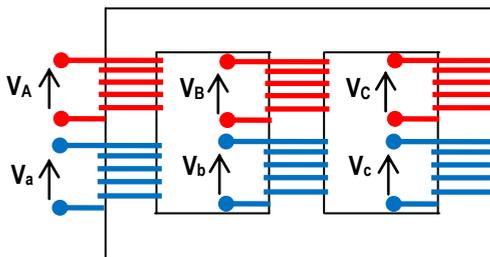
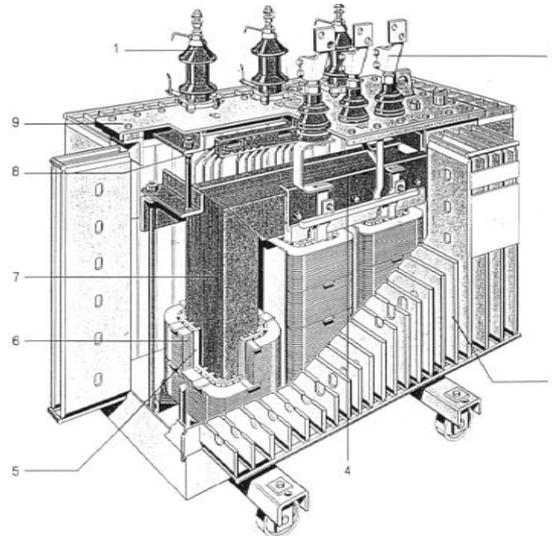


2) Constitution d'un transformateur triphasé:

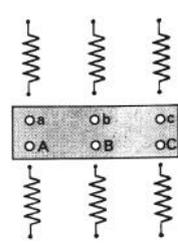
Afin de transformer l'amplitude des tensions d'un système triphasé, il faut théoriquement se servir de 3 transformateurs monophasés, dont les phases seront couplées, en fonction des contraintes, en étoile ou en triangle. En réalité, on se sert d'un seul circuit magnétique sur lequel sont bobinés les 6 bobinages. On appelle cela un transformateur triphasé. Il est de plus possible de coupler différemment le primaire et le secondaire pour, par exemple créer un neutre local ou apporter un déphasage entre certaines tensions.

Exemple de construction d'un transformateur triphasé

1. Traversée haute tension
2. Traversée basse tension
3. Ailettes de refroidissement
5. Isolation
6. Enroulement (galettes alternées)
7. Empilage de tôles



- Les transformateurs triphasés sont beaucoup plus utilisés dans l'industrie que les transformateurs monophasés.
- Les enroulements primaires et secondaires peuvent être couplés en (Y), en (Δ) ou en zig-zag (Z).



En générale on note :

- Les bornes « haute tension (HT) » en Majuscule : A, B, C.
- Les bornes « basse tension (BT) » en minuscule : a, b, c.

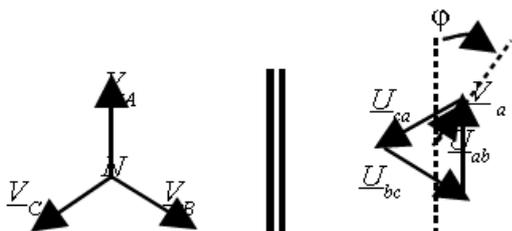
NB :

- la présence du neutre dans une distribution Basse Tension au niveau de la consommation permet de disposer de systèmes de tensions simples mais aussi de systèmes de tensions composés.
- Il faut éviter d'avoir le même couplage au primaire et au secondaire, ce ci évite de transmettre intégralement le déséquilibre de courants d'un côté vers l'autre.
- Les bobinages représentés côte à côte sont dits "en regard" et les tensions à leurs bornes sont proportionnelles de rapport $\frac{N_a}{N_A} = \frac{V_a}{V_A}$. Attention, $\frac{N_a}{N_A}$ n'est pas toujours égale au rapport de transformation (k).
- Les couplages les plus utilisés sont : **Yy, Yz, Yd, Dy, Dz.**

3) Rapport de transformation et indice horaire :

On désigne par rapport de transformation, k (ou m), le rapport entre une tension simple au secondaire et la tension simple correspondante au primaire.

Exemple : couplage **Yd** :



On représente Les tensions primaires et secondaires.

On note deux caractéristiques importantes :

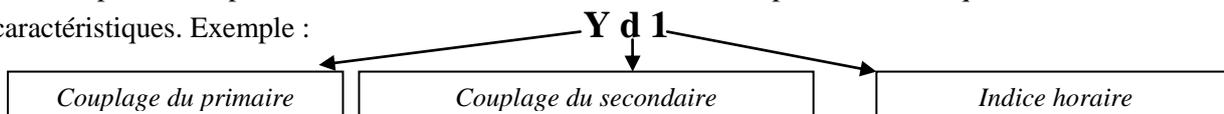
- $k = \frac{V_a}{V_A} = \frac{\frac{U_{ab}}{\sqrt{3}}}{V_A} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_a}{N_A}$
- Le déphasage entre V_A et V_a vaut $\frac{\pi}{6} = \frac{2\pi}{12} = 1h$

Donc : $\bar{V}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N_a}{N_A} * e^{j\frac{\pi}{6}} * \bar{V}_A = k * e^{j\frac{\pi}{6}} * \bar{V}_A$

Avec $n = \text{indice horaire}$.

Au décalage angulaire entre les tensions simples correspondantes, correspond un entier n (indice horaire) tel que : $\varphi = n * \frac{\pi}{6}$. Il est nommé ainsi car il s'identifie à l'angle formé par les aiguilles d'une montre.

Pour simplifier la représentation, on donne aux transformateurs triphasés un nom qui résume toutes les caractéristiques. Exemple :



Symbole	V_a/V_A	Montage électrique des phases	Diagramme vectoriel
Yy0	$\frac{n_2}{n_1}$		
Yd1	$\frac{n_2}{\sqrt{3} n_1}$		
Yz11	$\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{n_2}{n_1}$		
Dy11	$\sqrt{3} \frac{n_2}{n_1}$		
Dd0	$\frac{n_2}{n_1}$		
Zy1	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{n_2}{n_1}$		

4) Marche en parallèle des transformateurs triphasés

La puissance transmise par une centrale au réseau évolue au cours du temps en fonction de la consommation. Un transformateur unique qui est capable de transmettre la pointe maximale de consommation serait en général utilisé très en-dessous de son fonctionnement nominal, avec un rendement médiocre ou mauvais. On préfère disposer de plusieurs transformateurs de moindre puissance fonctionnant en parallèle de telle sorte qu'ils soient toujours au voisinage de leurs conditions nominales de marche.

Conditions de couplage en parallèle :

Des transformateurs sont en parallèle lorsque leurs primaires sont alimentés par un même réseau et leurs secondaires connectés à une même ligne ou débitent dans une même charge. Pour cela il faut que:

- ✓ Les transformateurs soient alimentés sous la même tension.
- ✓ Les rapports de transformations à vide soient identiques.
- ✓ Les tensions de court-circuit égales à 10 % près.
- ✓ Mêmes indice horaire de couplage ou indices compatibles

En pratique, on peut aisément modifier l'indice horaire d'un transformateur en effectuant une permutation circulaire des lettres affectées aux bornes : toute permutation correspond à une augmentation ou à une diminution de 4 de la valeur de l'indice horaire. On pourra donc coupler en parallèle sans difficulté des transformateurs dont les indices diffèrent de ± 4 .

Groupe	Indices	Couplages
I	0, 4,8	Yy, Dd, Dz
II	2, 6, 10	Yy, Dd, Dz
III	1, 5, 9	Dy, Yy, Yd
IV	3, 7,11	Dy, Yz, Yd