

# CHAPITRE 3

## MOTEUR ASYNCHRONE



# **PARTIE 1**

## **Rappel sur les systèmes triphasés équilibrés**



# Le triphasé en électricité

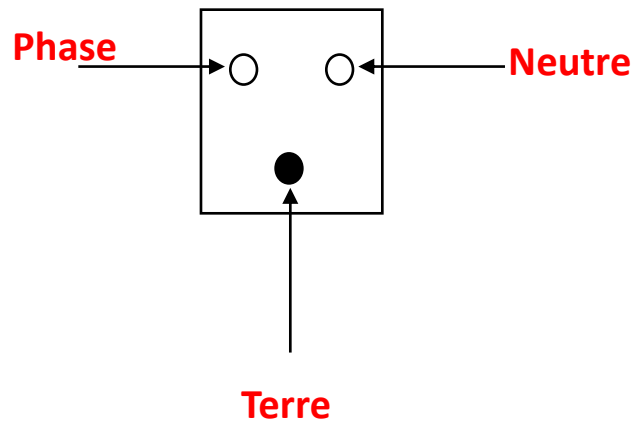
- Réseau électrique
- Délivre 3 phases + neutre
- Délivre 2 tensions différentes
  - 230 V/400 V
  - 127 V/220 V
- Tensions alternatives
- Tensions déphasées

3~

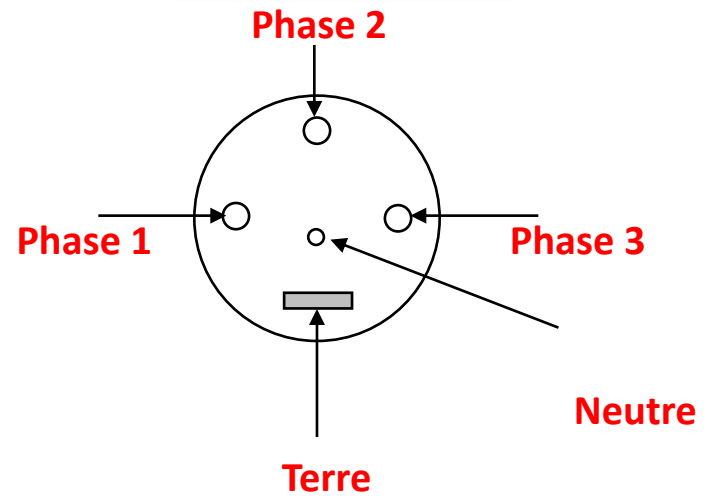


Poteau électrique triphasé

## Prise monophasée



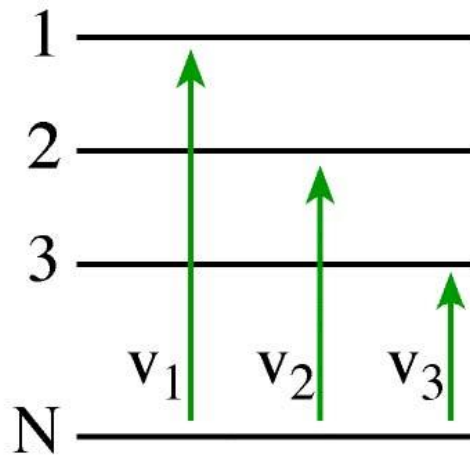
## Prise triphasée



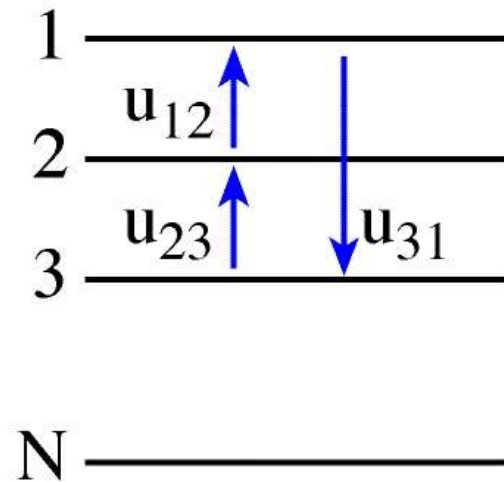
# Systèmes triphasés

## Définition d'un système triphasé

On appelle **système triphasé** un ensemble de 3 grandeurs sinusoïdales du temps de **même nature**, de **même fréquence** et **déphasées entre elles de  $2\pi/3 = 120^\circ$**



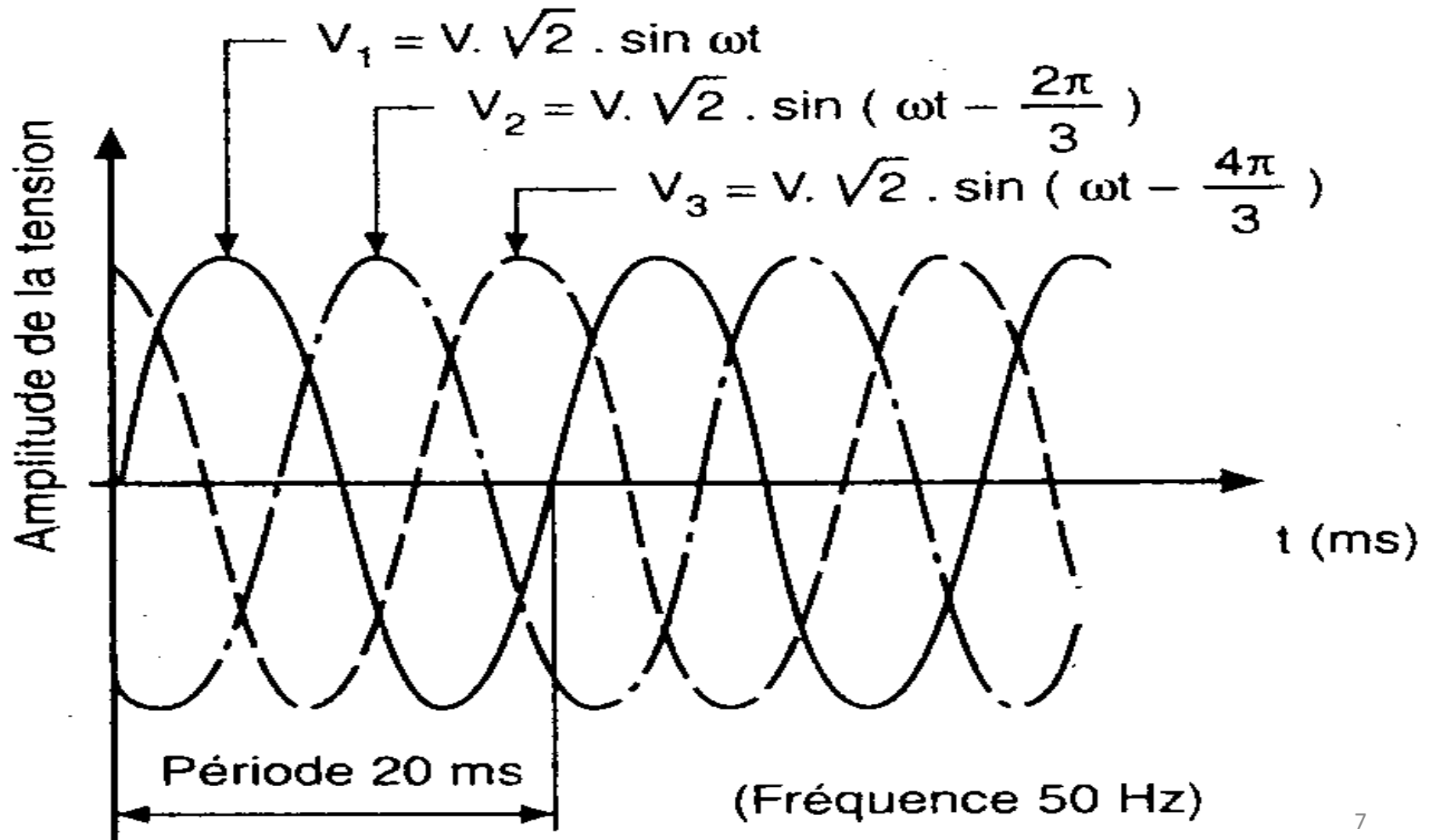
Tensions simples



Tensions composées

# Livraison

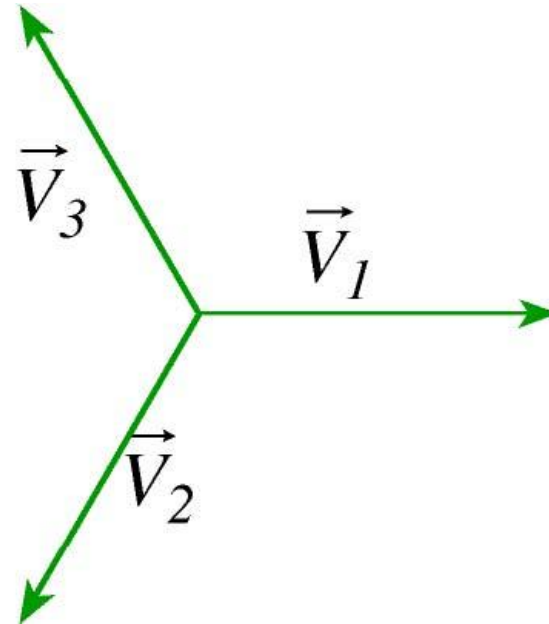
## le réseau triphasé



Triphasé équilibré direct :

$$\sum \vec{V}_i = \vec{0}$$

Vecteurs de Fresnel :

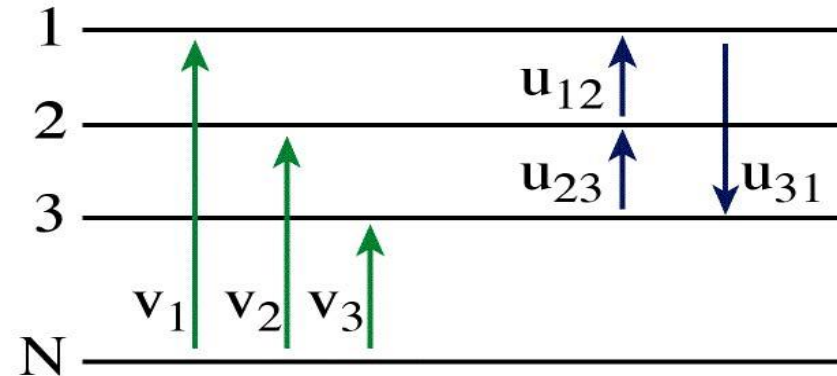


$$V_1 = V_2 = V_3 = V$$

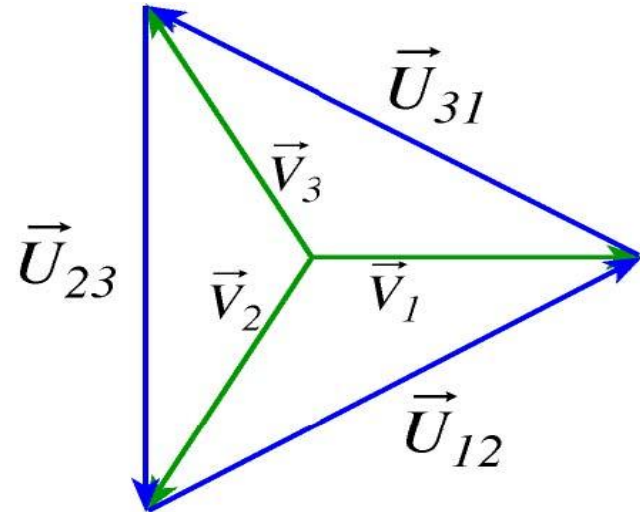
$$\varphi_{V_1/V_2} = \varphi_{V_2/V_3} = \varphi_{V_3/V_1} = 2\pi/3$$



## Tensions composées

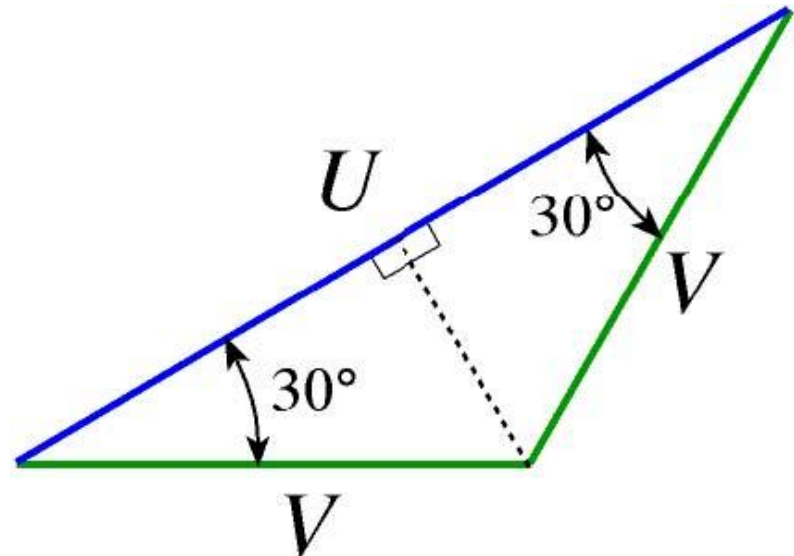


## Vecteurs de Fresnel



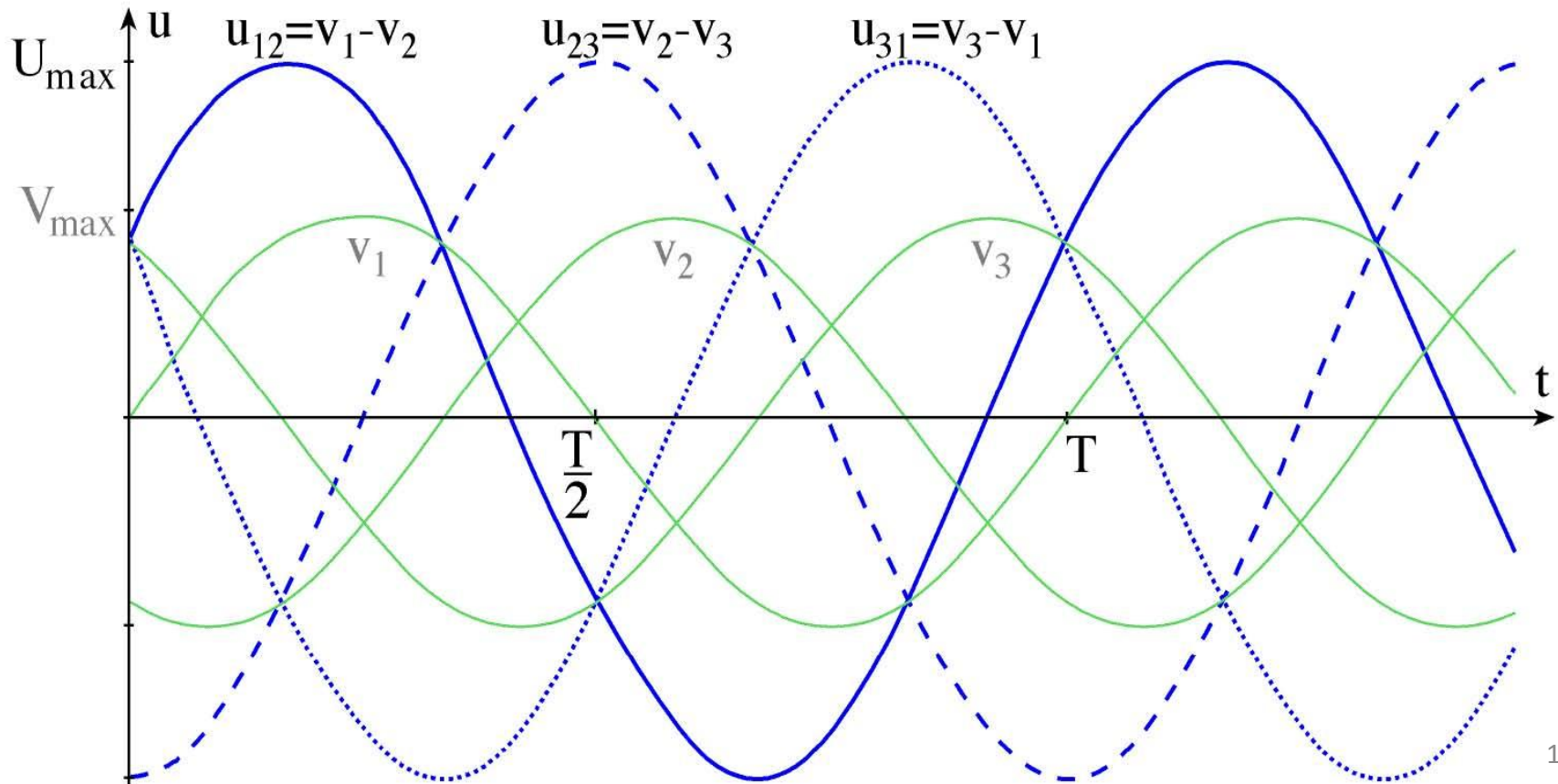
## Relation entre U et V

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

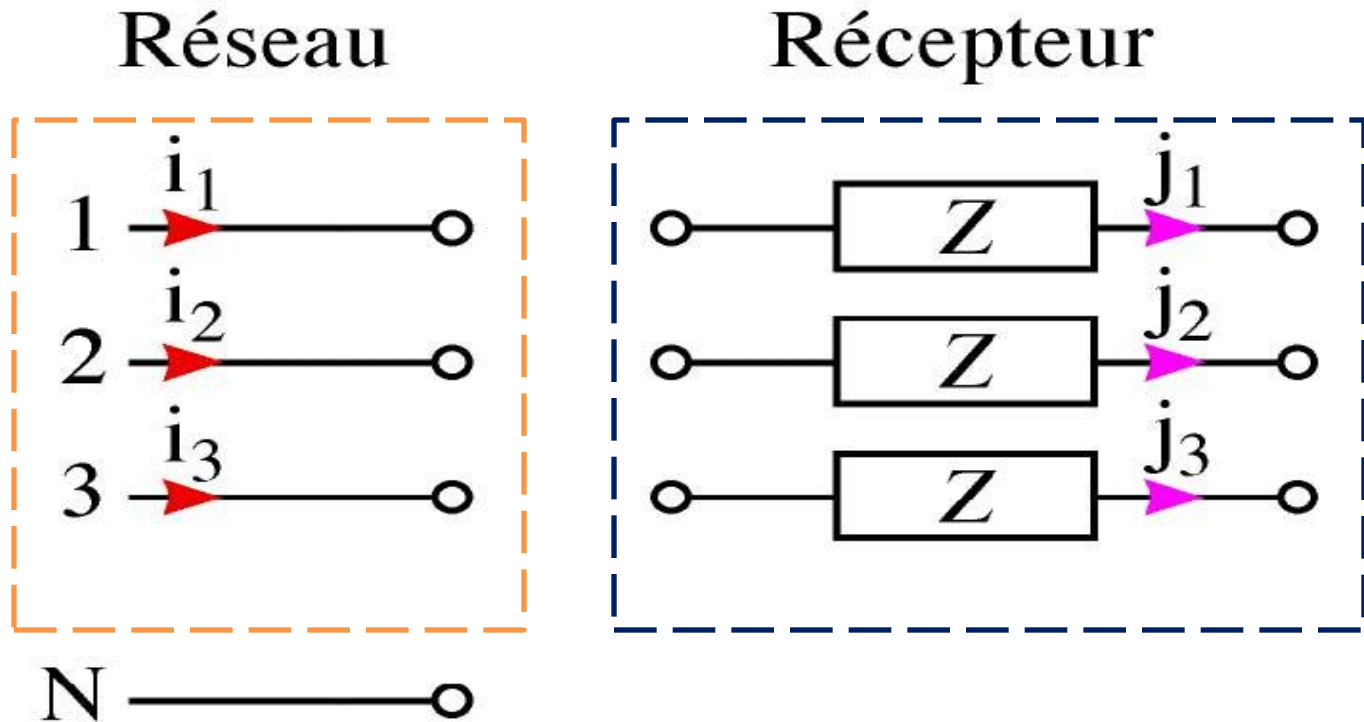


## Equations horaires

$$\begin{cases} u_{12} = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \\ u_{23} = U\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \\ u_{31} = U\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{7\pi}{6}) \end{cases}$$



## Récepteur triphasé équilibré

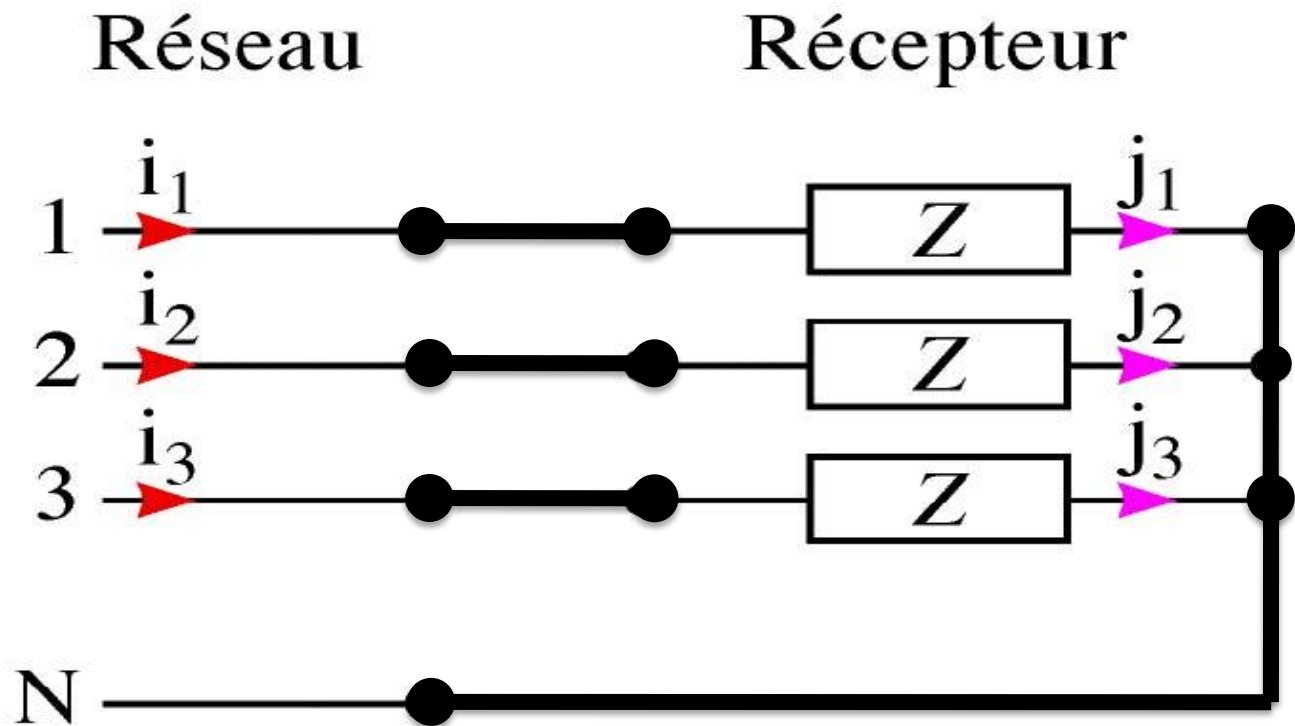


*COUPLAGE ?*

$i_i$  : courants de ligne

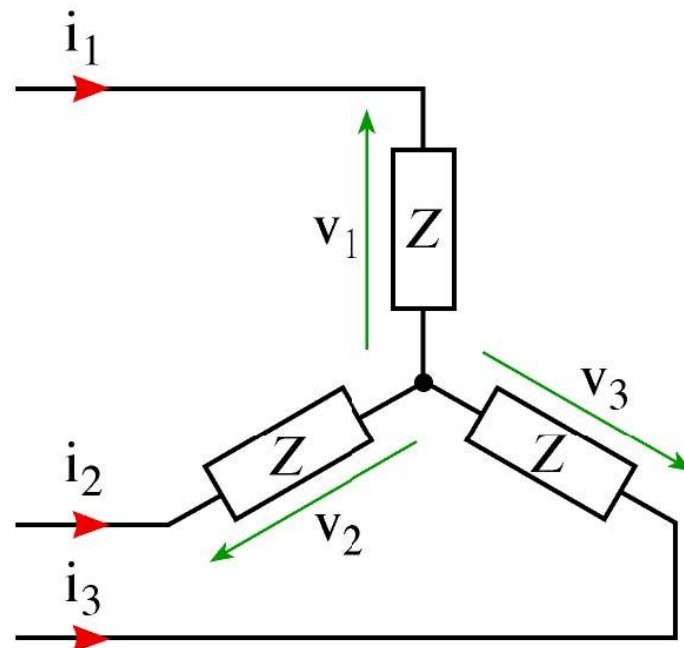
$j_i$  : courants dans les charges ou de phase

# Couplage étoile Y

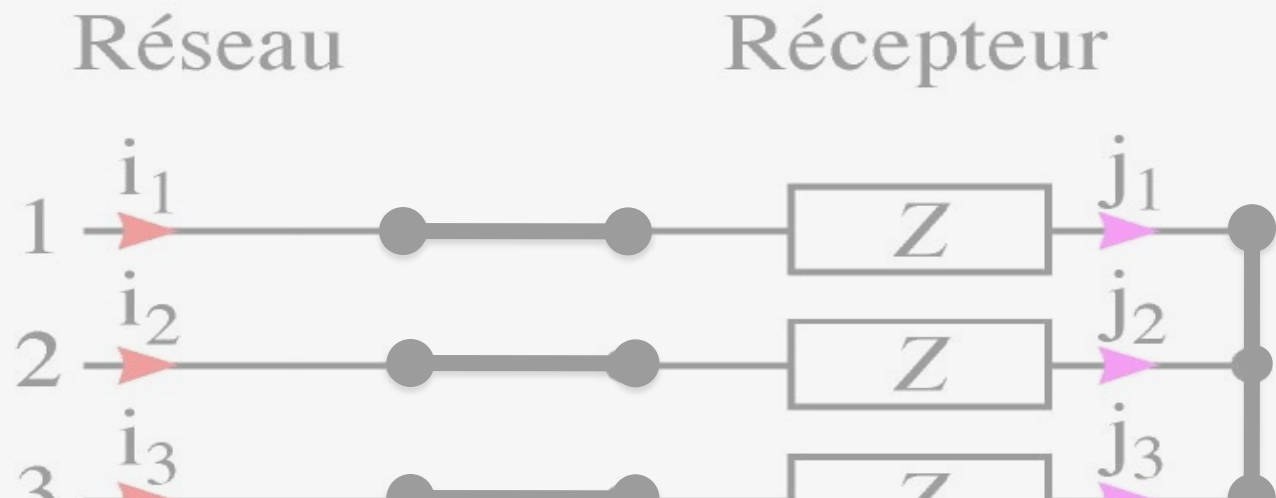


$$i_i = j_i$$

$$i_1 + i_2 + i_3 = i_N$$



## Couplage étoile Y

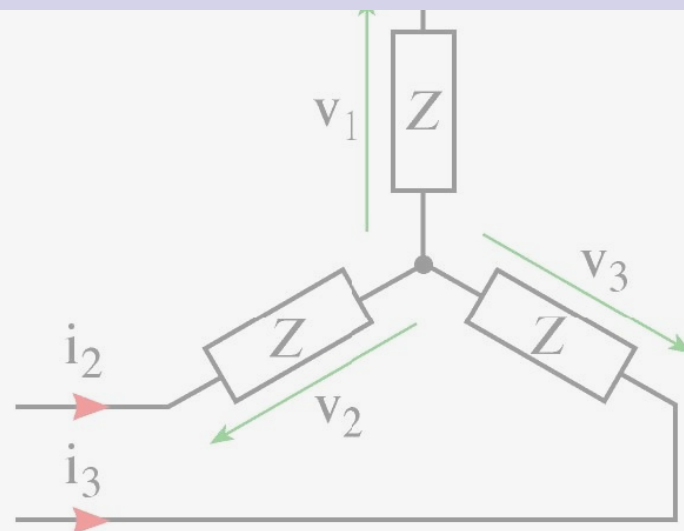


### Définition

Les trois éléments ont tous une borne en commun connectée au neutre, l'autre borne étant connectée sur l'une des trois phases.

$$\dot{i}_i = \dot{j}_i$$

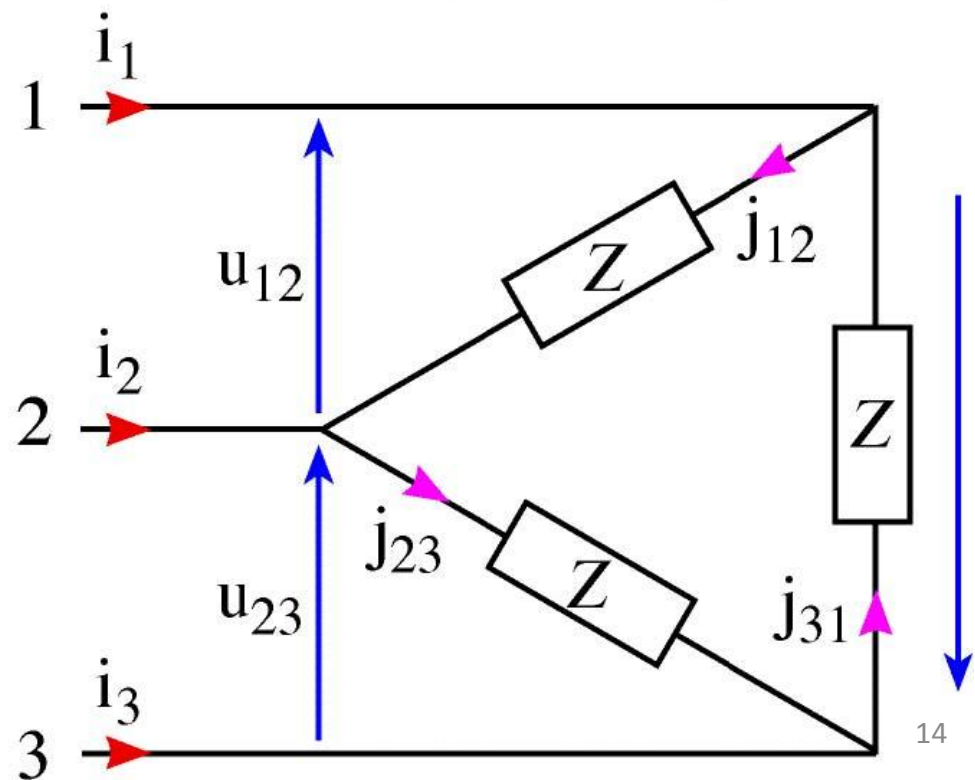
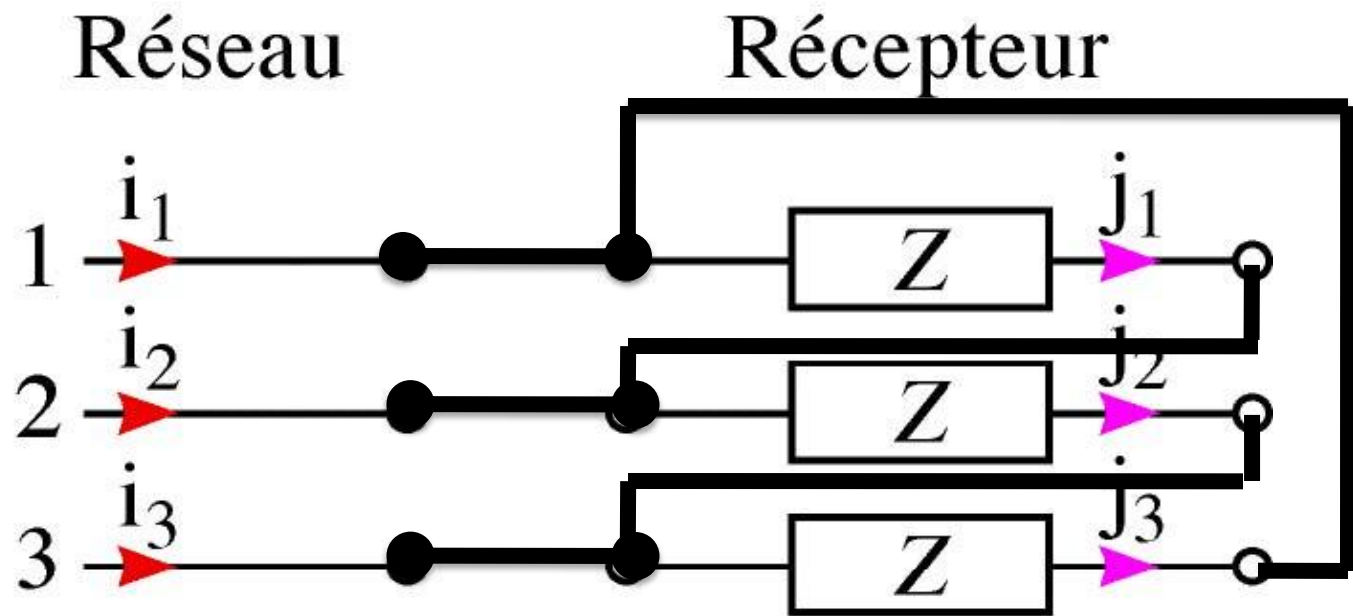
$$\dot{i}_1 + \dot{i}_2 + \dot{i}_3 = \dot{i}_N$$



# Couplage Triangle

$$i_i = \sqrt{3} \cdot j_i$$

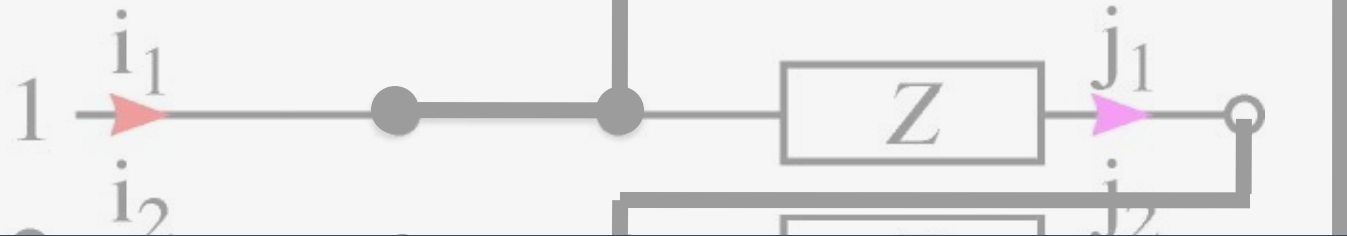
● Le neutre n'est pas utilisé



## Couplage

Réseau

Récepteur

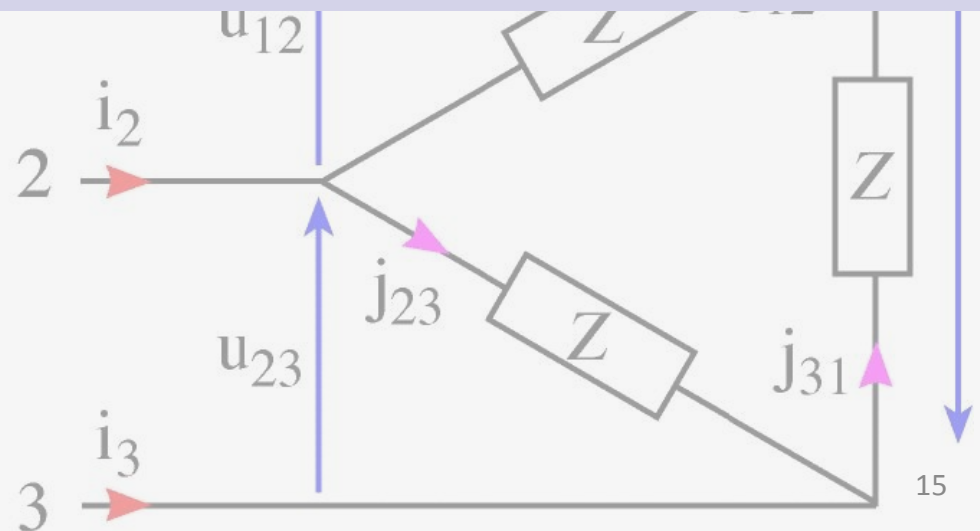


## Le couplage triangle ( $\Delta$ )

### Définition

Chaque élément est relié aux deux autres éléments par ses bornes. Les bornes communes sont connectées à la ligne.

$$i_i = \sqrt{3} \cdot j_i$$



● Le neutre n'est pas utilisé

# Tableau récapitulatif

Relations entre courants et tensions dans les couplages **équilibrés**

Couplage	Étoile équilibrée	Triangle équilibré
Courants	$I = J$	$I = \sqrt{3}J$
Tensions	$U = \sqrt{3}V$	$U = V$
Neutre	Potentiel du point commun	Non utilisé



# Caractérisation d'un réseau triphasé

- Réseau triphasé : présence de  $U$  et  $V$

## Convention

On désigne un réseau triphasé par sa tension de ligne (ou composée)  $U$ .

- Exemples :
  - Réseau délivrant 127/220 V = réseau 220 V
  - Réseau délivrant 220/380 V = réseau 380 V

# Puissances en triphasé

- La puissance **active**  $P$  :
  - La seule à être **physiquement** une puissance
  - Liée à un **transformation d'énergie**
  - Mesurée avec un wattmètre
  - Unité : le watt (W)
  - Le **rendement** est un rapport de **puissances actives**
- La puissance réactive  $Q$ 
  - Phénomènes d'accumulation électrostatique ou magnétique
  - Pas de dépense d'énergie **en moyenne**
  - Action sur le courant à travers son **déphasage**
  - Unité : le volt-ampère réactif (VAR)
- La puissance apparente  $S$  :
  - Puissance de **dimensionnement** : section des câbles
  - Capacité d'un récepteur à absorber un courant  $I$  sous une tension  $V$
  - Mesurée en volt-ampère (VA)

# Puissance active

- En étoile :

$$P = 3 \, V I \cos \varphi \xRightarrow{U=\sqrt{3}V} \boxed{P = \sqrt{3} \, U I \cos \varphi}$$

où  $\varphi$  est le déphasage entre  $I$  et  $V$

- En triangle :

$$P = 3 \, U J \cos \varphi \xRightarrow{I=\sqrt{3}J} \boxed{P = \sqrt{3} \, U I \cos \varphi}$$

où  $\varphi$  est le déphasage entre  $U$  et  $J$

- Dans le cas général :
  - La relation est **la même** pour les deux montages
  - Attention à  $\varphi$  : déphasage dans les **éléments** du récepteur

# Puissances réactive et apparente

- Puissance réactive  $Q$  :

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$$

*valable en **étoile** et en **triangle***

où  $\varphi$  est le déphasage entre les grandeurs traversant les éléments :

- $I$  et  $V$  en étoile
- $J$  et  $U$  en triangle

- Puissance apparente  $S$  :

$$S = \sqrt{3} UI \quad \text{et} \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

*valable en **étoile** et en **triangle***

$\Rightarrow \varphi$  n'intervient pas

# Facteur de puissance

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

## Définition

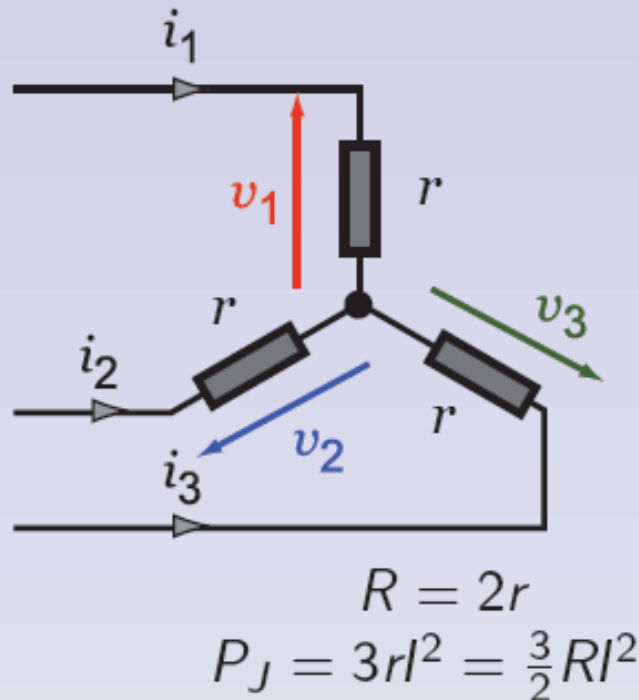
On appelle **facteur de puissance** le terme  $\cos \varphi$ .

- Supposons  $P$  et  $U$  données : si  $\cos \varphi$  faible alors
  - Courant plus élevé
  - Plus de puissance réactive
- Distributeurs :
  - Facturent la puissance active
  - Pertes en ligne fonction du courant
  - Pénalisation des installations à faible  $\cos \varphi$
- Utilisateurs
  - Circuits plutôt inductifs (câbles, bobinages, etc.)
  - Inductances :  $Q > 0$  et capacités :  $Q < 0$
  - Compensation de  $Q$  à l'aide de batteries de condensateurs

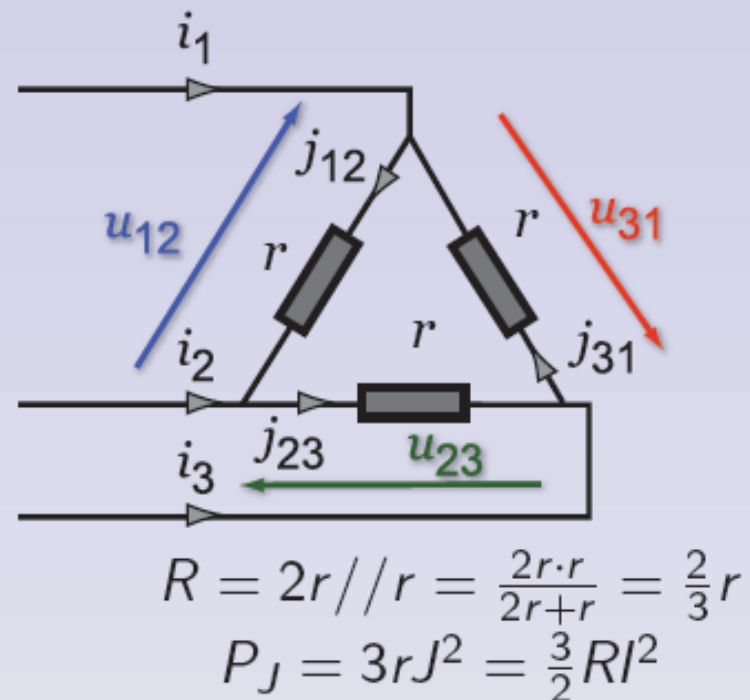
# Pertes Joule dans le cas équilibré

$r$  = résistance d'un enroulement,  $R$  = résistance entre deux bornes

- Montage étoile



- Montage triangle



$$P_J = \frac{3}{2}Rl^2 \text{ en étoile et en triangle}$$

# Méthode des deux wattmètres

Condition d'utilisation : il faut que  $i_N = 0$

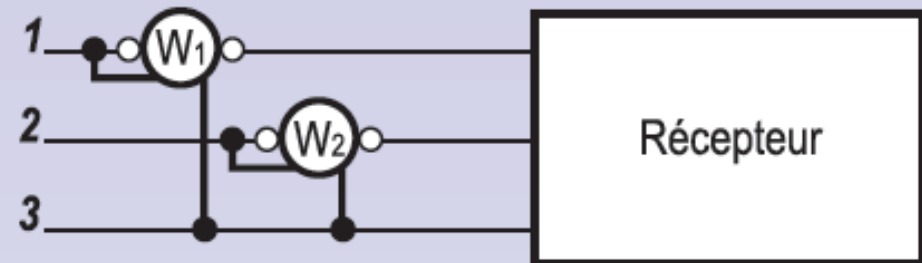
- Triphasé 3 fils
- Triphasé 4 fils équilibré

Dans tous les cas :

$$P = P_1 + P_2$$

- Dans le cas **équilibré** uniquement :

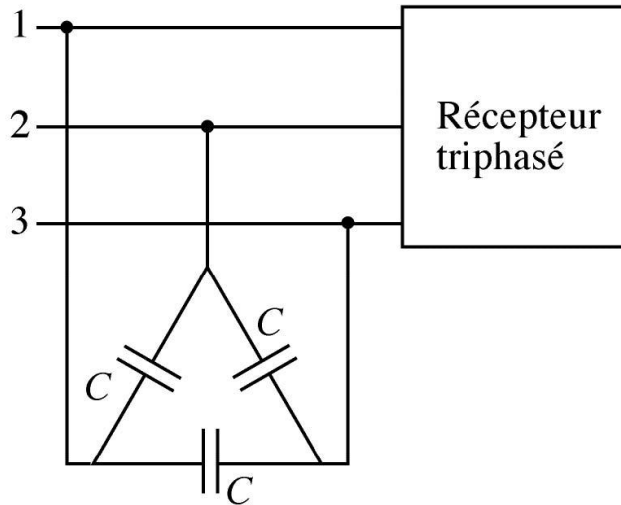
$$Q = \sqrt{3}(P_1 - P_2) \text{ et donc } \tan \varphi = \frac{\sqrt{3}(P_1 - P_2)}{P_1 + P_2} = \frac{Q}{P}$$



*Astuce : le point commun pour la tension est pris là où l'on ne mesure pas le courant*

# Relèvement du facteur de puissance

récepteur triangle :



$$Q_c = -C\omega U^2$$

$$Q_{c_{Tot}} = 3Q_c = -3C\omega U^2$$

	Puissance active	Puissance réactive	Facteur de puissance
Charge seule	$P$	$Q = P \tan \varphi$	On a $\cos \varphi$
Les trois condensateurs seuls	0	$Q_c = -3C\omega U^2$	0
Charge + condensateurs	$P$	$Q' = Q + Q_c = P \tan \varphi'$	On veut $\cos \varphi' > \cos \varphi$



## **PARTIE 2**

# **Technologie et Fonctionnement du moteur asynchrone**

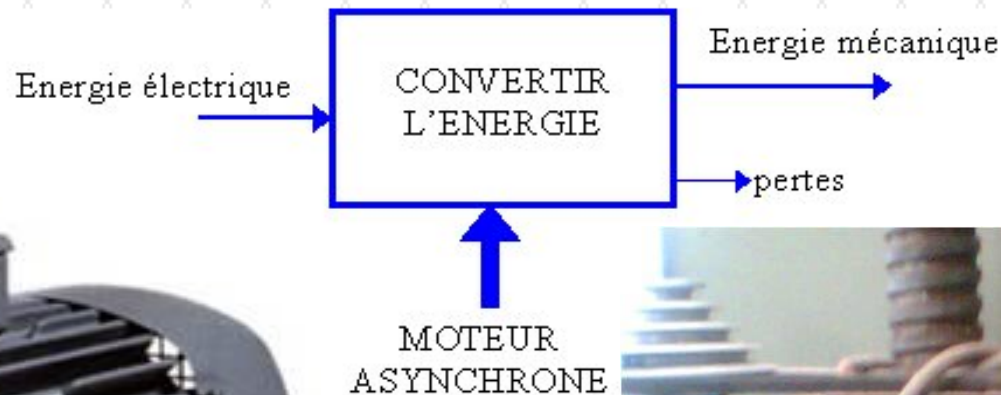


# Les moteurs asynchrones

## I)- GENERALITES

Le moteur asynchrone représente 80% des moteurs utilisés industriellement, étant donné leur simplicité de construction et leur facilité de démarrage. D'autre part à puissance égale, c'est le moteur le moins cher. Il ne nécessite pas de source de tension particulière puisqu'il fonctionne sous la tension réseau.

### 1)- FONCTION D'USAGE



# Un peut d'histoire

## Le moteur asynchrone :

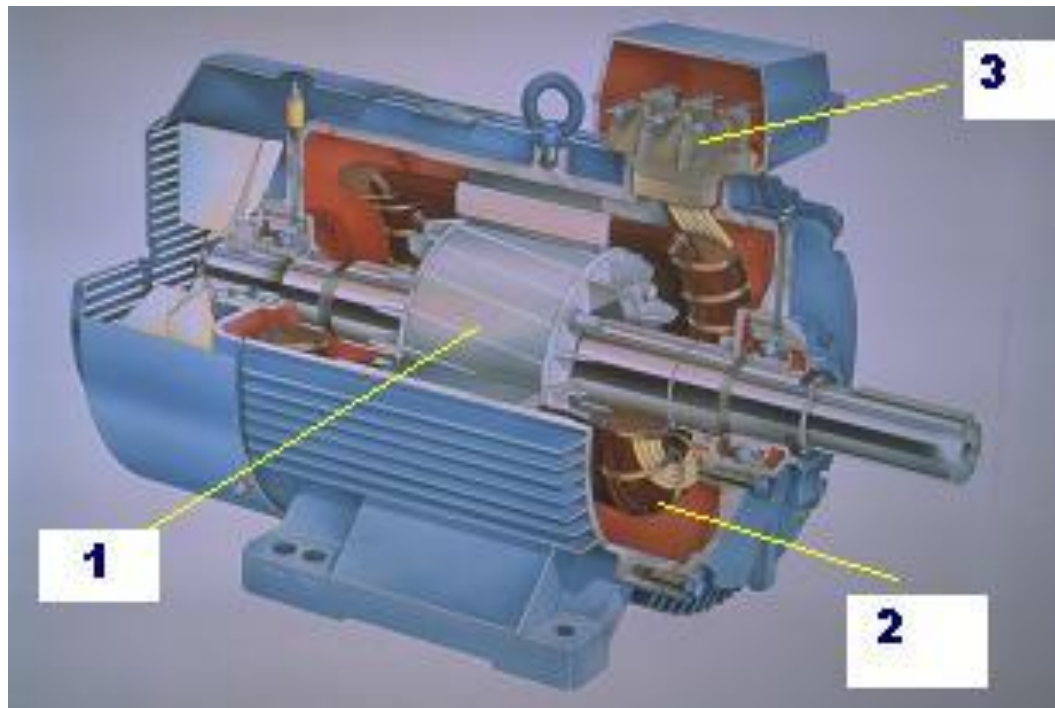
Le principal point faible des moteurs électriques à courant continu a toujours été le système mécanique collecteur-balais, cher et fragile, source de pannes fréquentes. Cherchant à concevoir un moteur électrique sans collecteur Tesla découvrit en 1882 les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courants polyphasés. En 1883 il construisit son premier moteur à champ magnétique tournant. Dans ce genre de moteur, dit à induction, le stator comprend des bobines fixes et régulièrement disposées qui engendrent un champ magnétique tournant lorsqu'elles sont parcourues par les diverses "phases".

Le champ tournant induit des courants dans un rotor ; l'interaction du champ magnétique et des courants du rotor exerce sur celui-ci un couple qui tend à lui faire rattraper le champ tournant.

Si le rotor tournait à la même vitesse que le champ statorique il n'y aurait plus de courants induits, donc plus de couple.

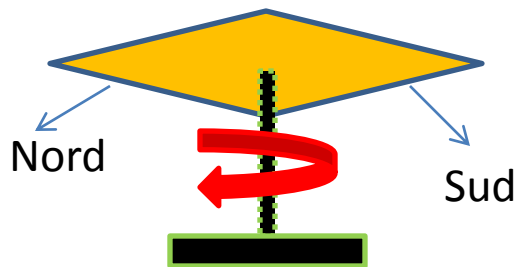
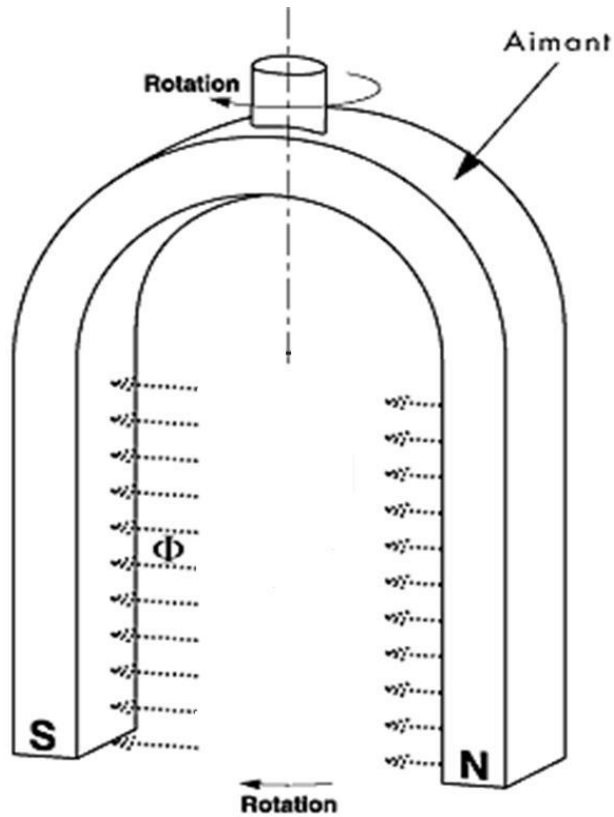
En régime normal le rotor tourne donc à une vitesse inférieure au synchronisme d'où son autre nom de moteur asynchrone.

# Moteur asynchrone triphasé



- 1 : rotor : circuit magnétique tournant
- 2 : stator : circuit magnétique fixe + 3 enroulements
- 3 : plaque à bornes pour l'alimentation et le couplage.

# CHAMPS TOURNANTS: par aimant tournant



Aiguille aimantée

## Action sur une aiguille aimantée:

Faisons tourner l'aimant

l'aiguille tourne à la même vitesse que lui, on dit qu'elle tourne au « **synchronisme** ».

$$n = n_s$$

$n$ : vitesse de l'aiguille,  $n_s$ : vitesse du champ tournant

L'attraction mutuelle des pôles de noms contraires explique ce phénomène.

Ainsi un champ tournant peut entraîner à la même vitesse que lui un aimant ou un électroaimant:

Nous avons là le principe du **moteur synchrone**.



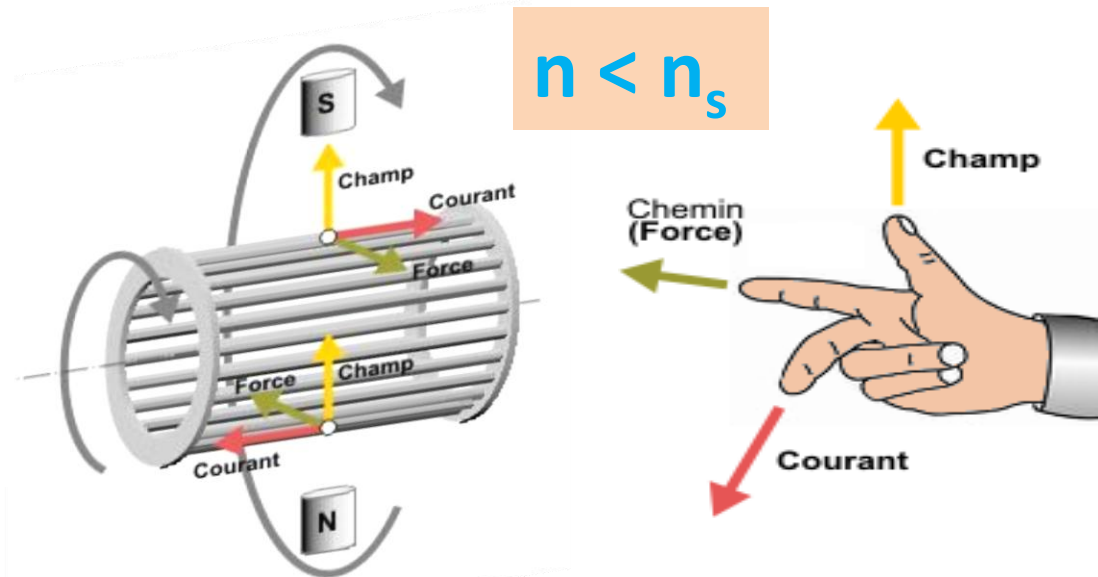
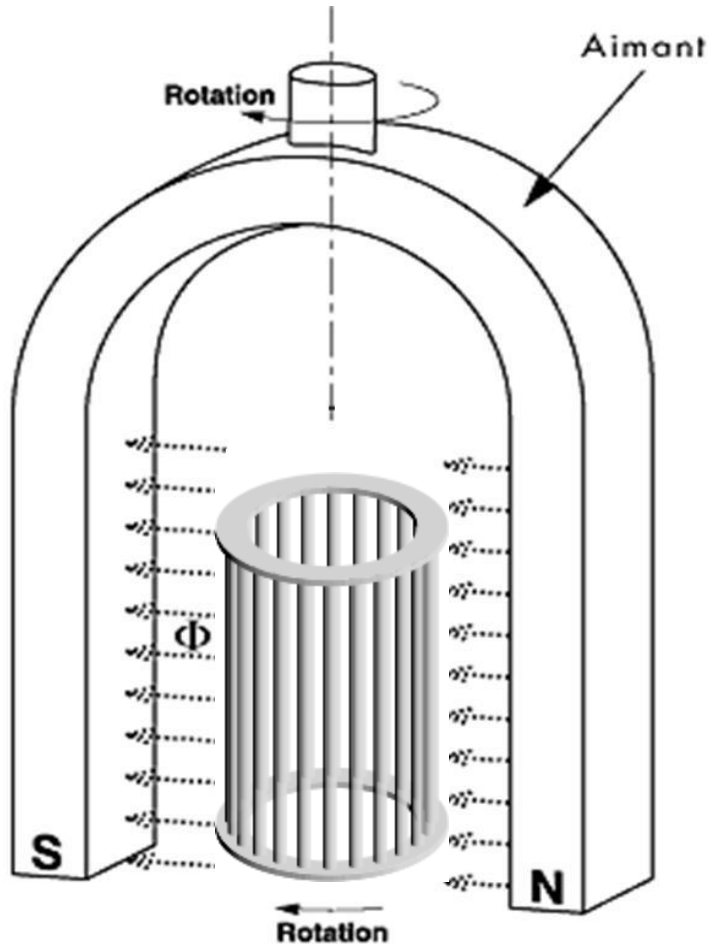


# CHAMPS TOURNANTS: par aimant tournant

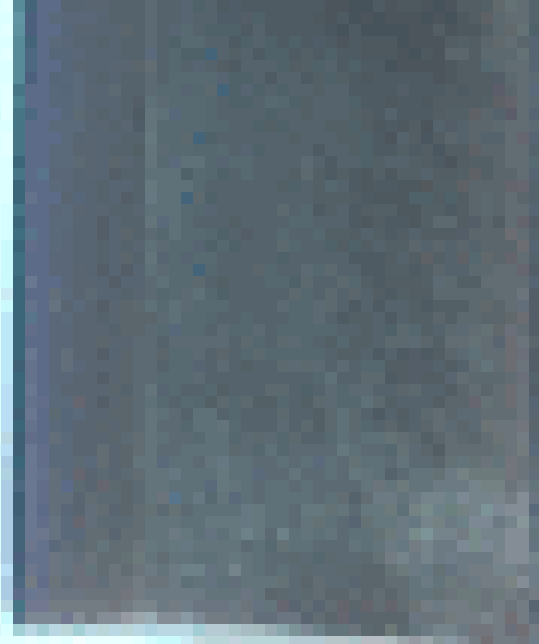
## Action sur un conducteur:

Le champ tournant induit un courant dans le conducteur. L'interaction entre ce courant et le champ crée une force dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite.

C'est le principe du **moteur asynchrone**



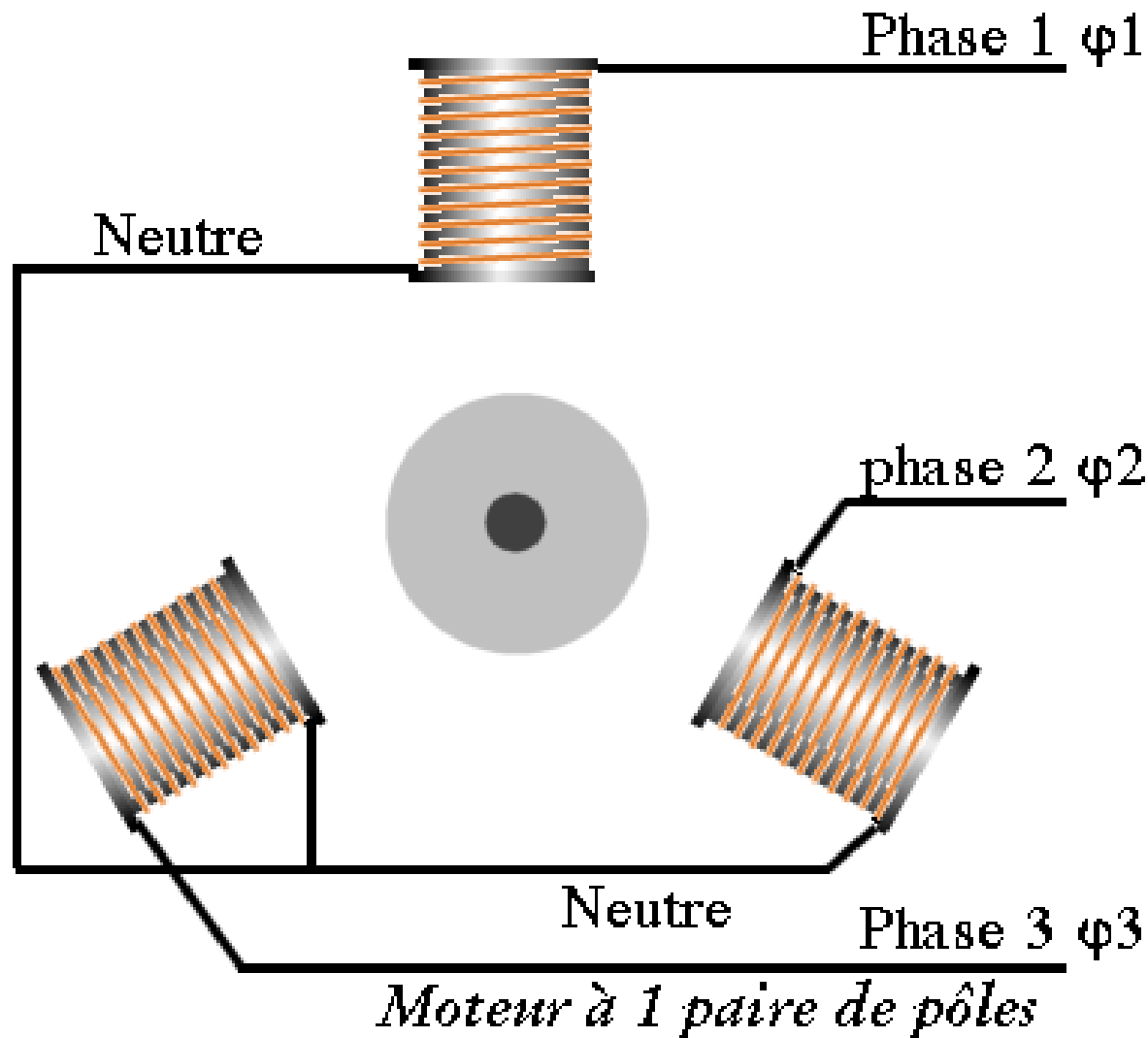
On constate que le cylindre suit la rotation de l'aimant avec un léger décalage appelé **glissement**.





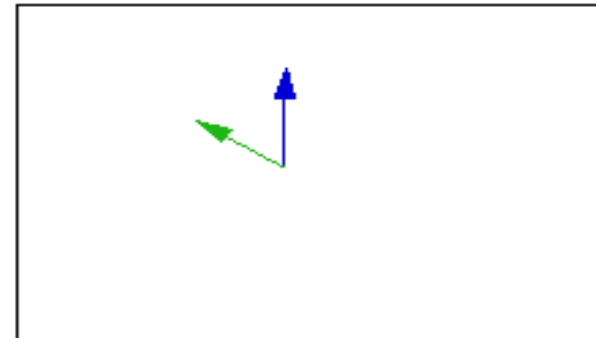
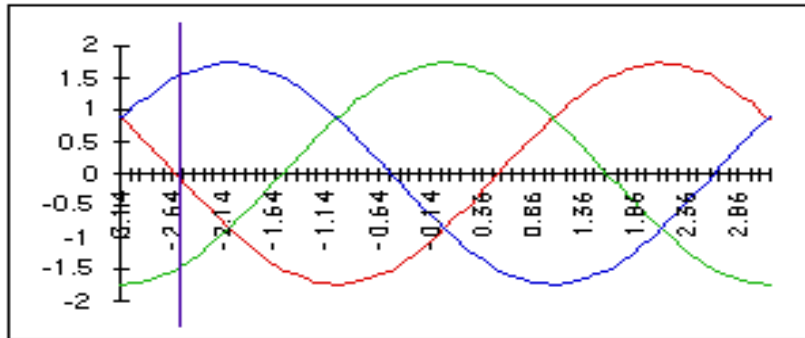
# CHAMPS TOURNANTS: en triphasé

3 enroulements placés à  $120^\circ$  l'une de l'autre, alimentés par une source triphasé

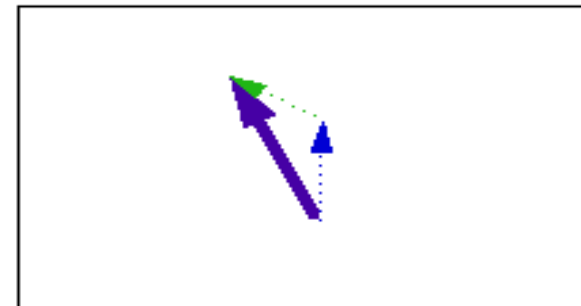


# CHAMPS TOURNANTS: en triphasé

champ tournant à  $t=1$  :



flux magnétiques induits

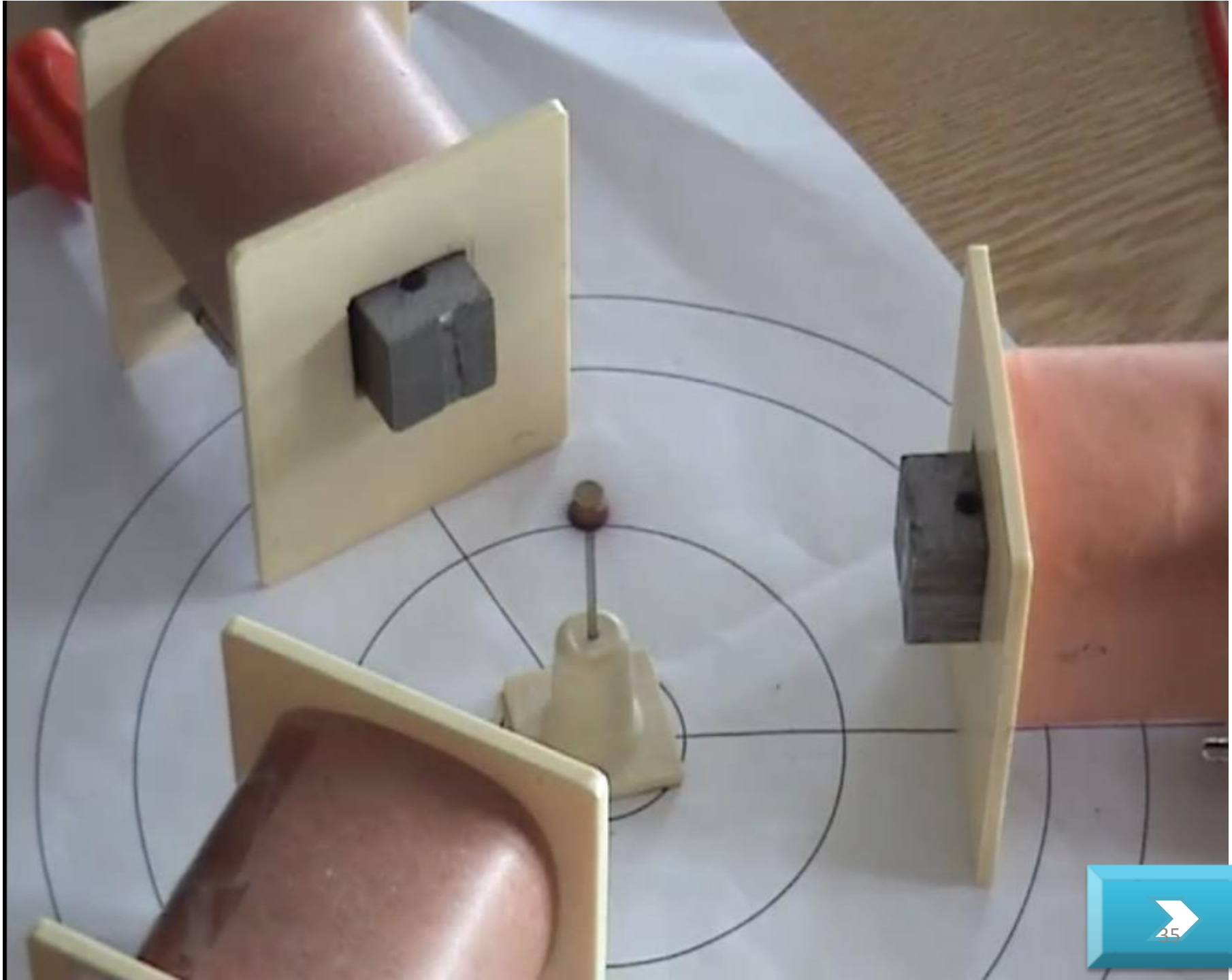


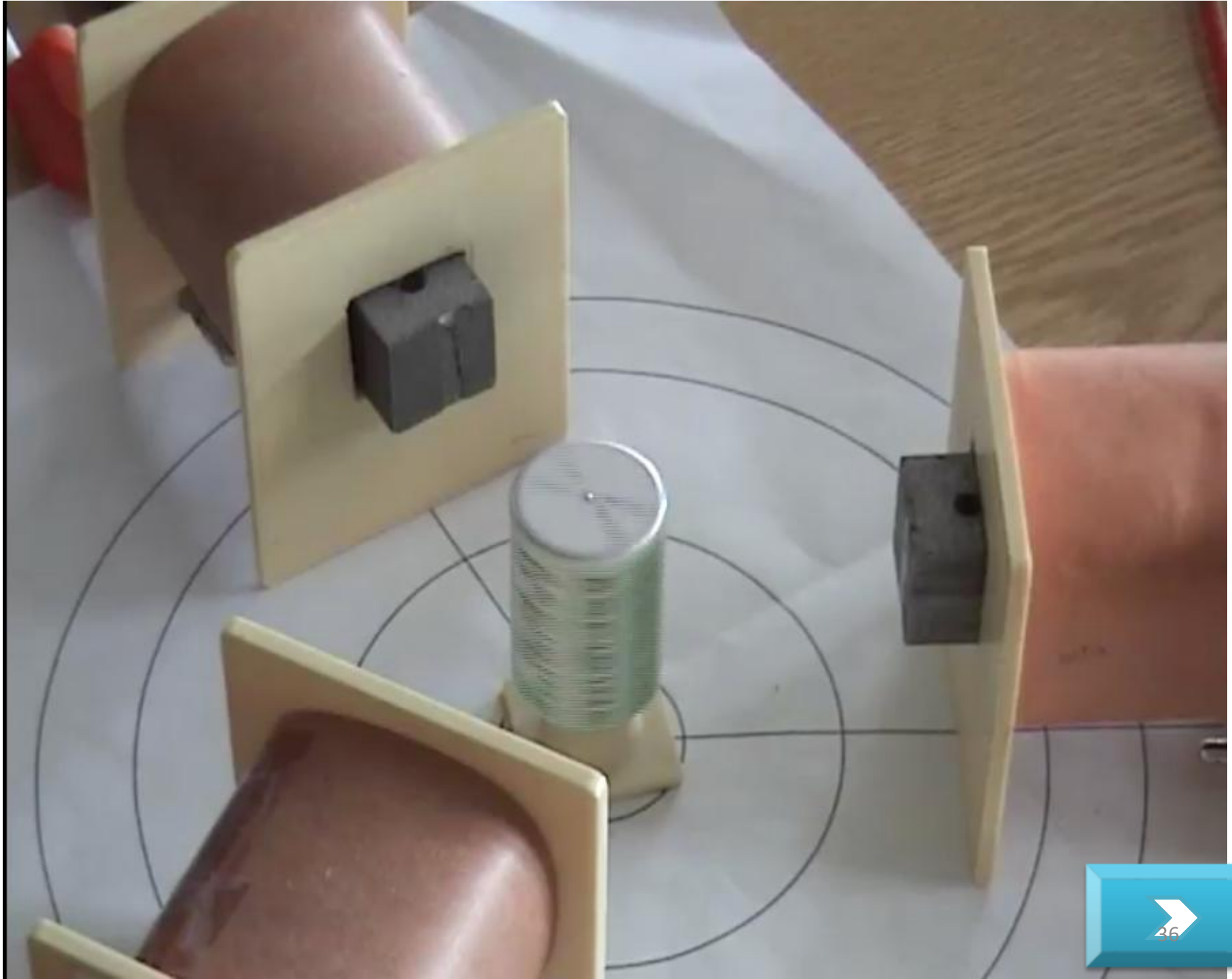
résultante

$$n_s = f$$

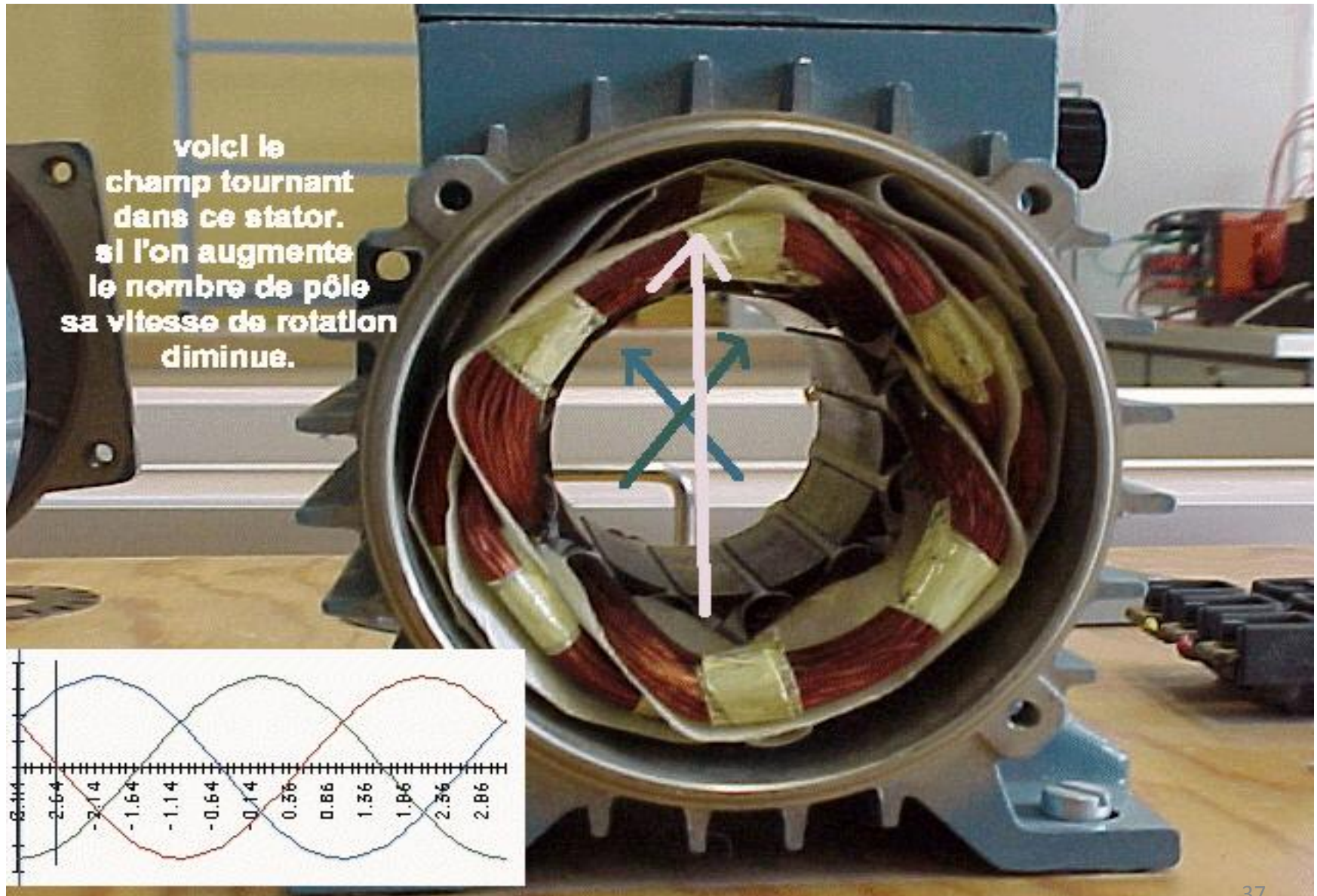
$n_s$ : vitesse du champ tournant

$f$ : fréquence de la tension réseau





# CHAMPS TOURNANTS: en triphasé





# VITESSE DU CHAMP TOURNANT

$$n_s = fs / p \quad \text{en tours/seconde}$$

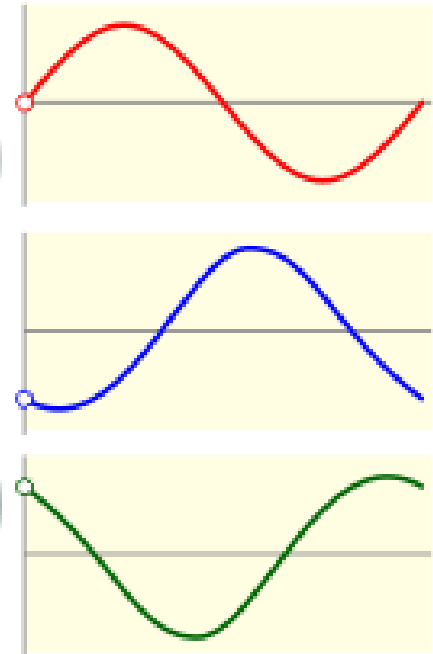
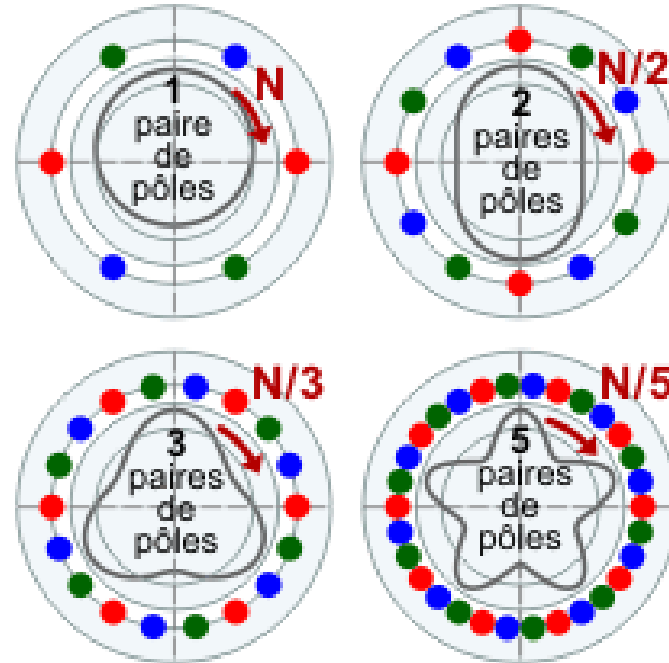
$$n_s = 60 fs / p \quad \text{en tours/minute}$$

avec:

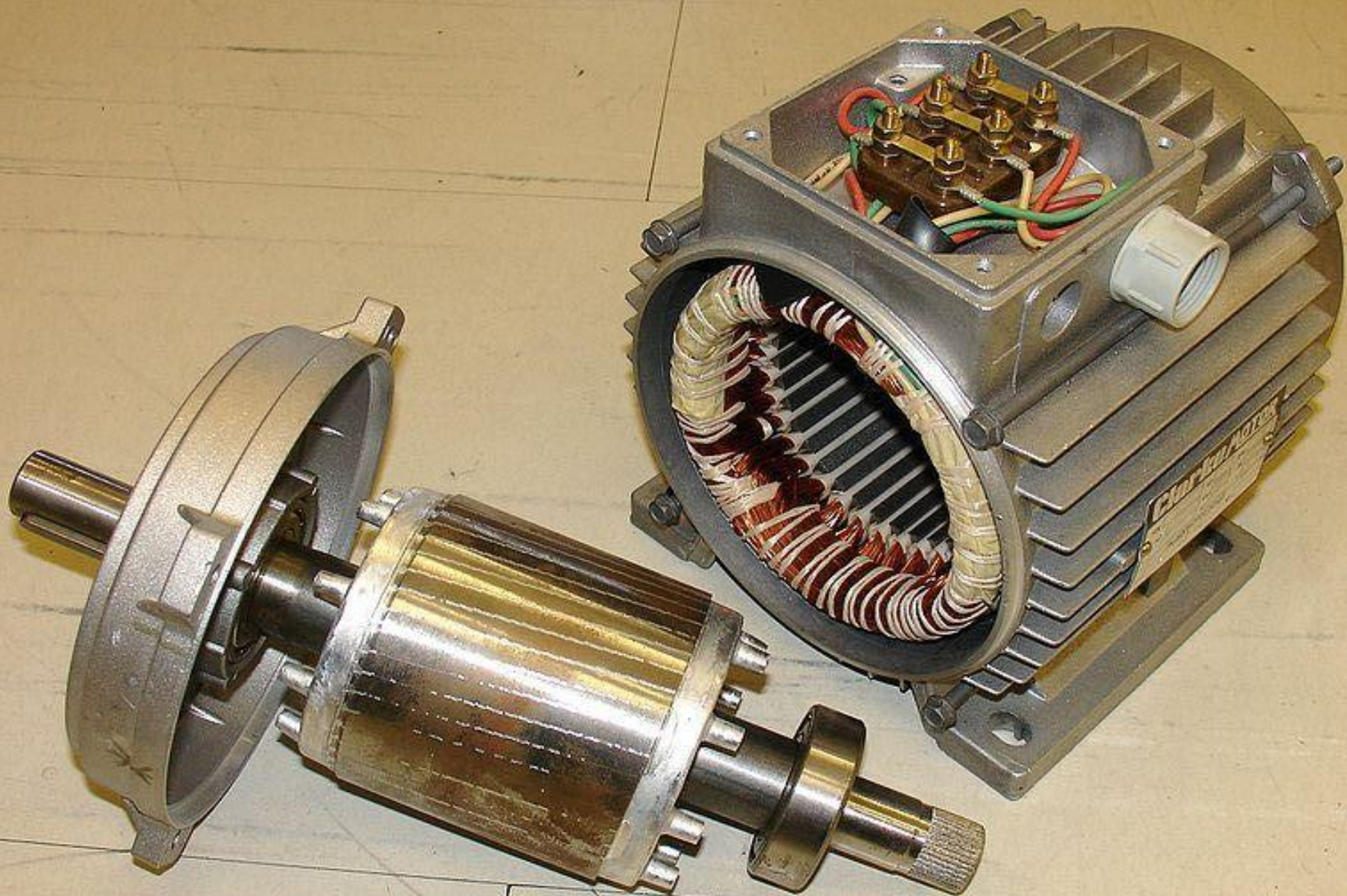
$n_s$  : la vitesse du champ tournant

$f$  : la fréquence du réseau

$p$  : le nombre de paires de pôles



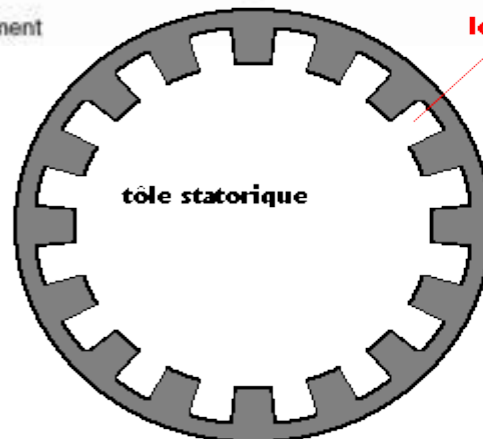
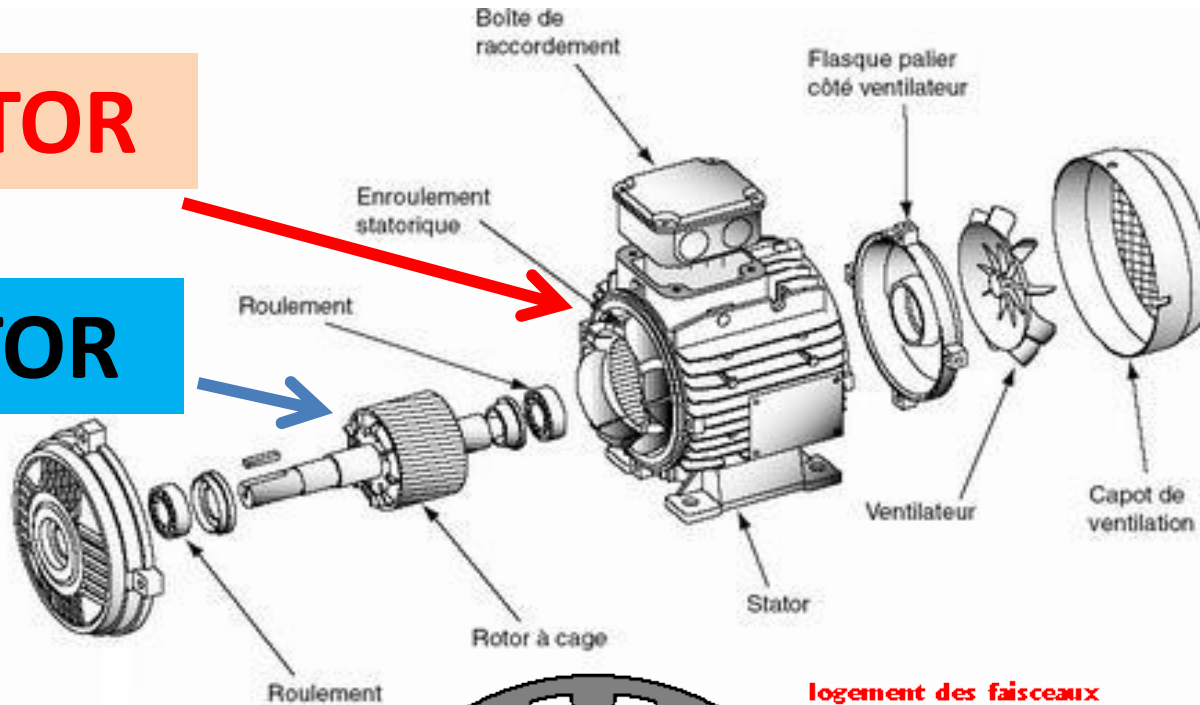
Paires de pôles	1	2	3	4
Nombre de pôles	2	4	6	8
$n_s$ [tr/min]	3 000	1 500	1 000	750



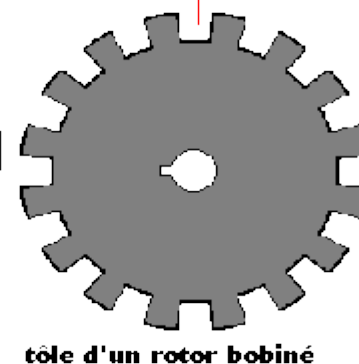
# ORGANISATION

**STATOR**

**ROTOR**

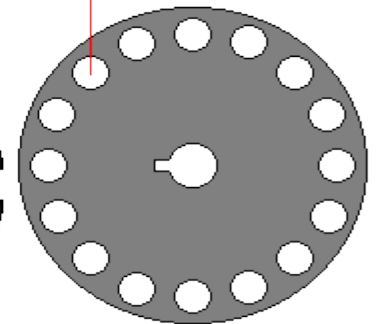


logement des faisceaux



tôle d'un rotor bobiné

logement des barres



tôle d'un rotor à cage



# ORGANISATION

## STATOR

Le stator d'un moteur triphasé (le plus courant en moyenne et grosse puissance), comme son nom l'indique, est la partie statique du moteur asynchrone. Il se compose principalement :

- de la carcasse, des paliers, des flasques de palier, du ventilateur refroidissant le moteur, le capot protégeant le ventilateur.

L'intérieur du stator comprend essentiellement :

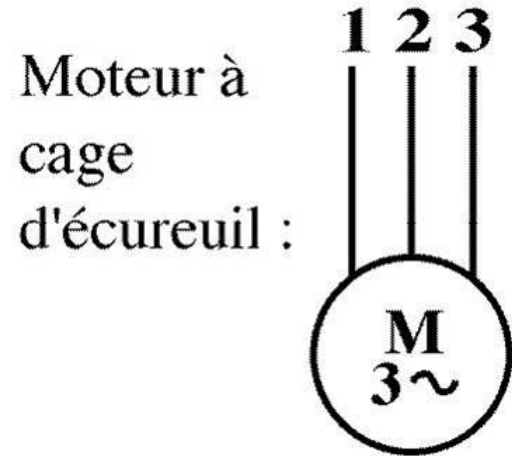
un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique,

Les 3 enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases logés dans les encoches du noyau.

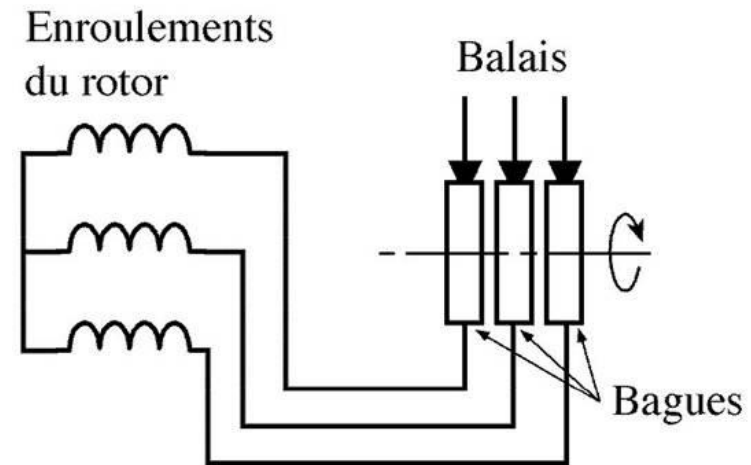
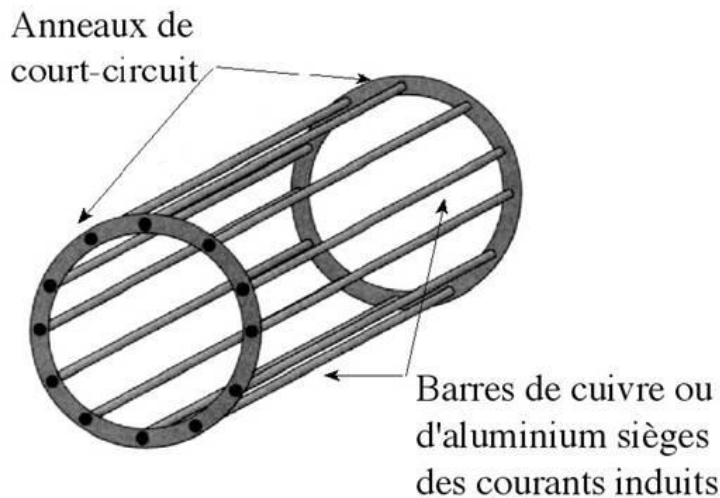
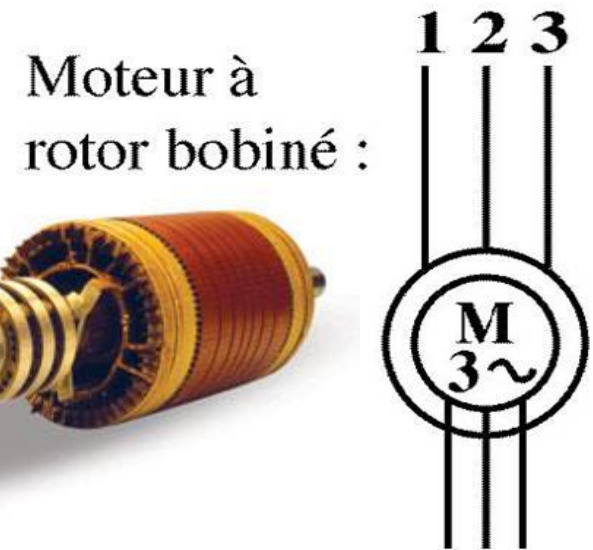
Dans un moteur triphasé les enroulements sont au nombre minimum de trois décalés l'un de l'autre de  $120^\circ$  comme le montre le schéma ci-dessous.

Lorsque les enroulements du stator sont alimentés par une source triphasée, ceux-ci produisent un champ magnétique tournant à la vitesse de synchronisme. La vitesse de synchronisme est fonction de la fréquence du réseau d'alimentation (50 Hz en Europe) et du nombre de paire de pôles.





# ROTOR



Le moteur asynchrone à cage ne permet pas d'avoir simultanément un bon couple de démarrage et un courant de démarrage raisonnable,

Il n'est donc utilisé que pour les petits moteurs et pour les gros moteurs n'ayant pas besoin de démarrer avec leur pleine charge

# Fonctionnement du moteur asynchrone

## Glissement

La différence de vitesse de rotation entre l'arbre du moteur et le champ tournant statorique est appelée le glissement, nous le noterons  $g$ . Le glissement dépend de la charge mécanique du moteur : plus le moteur doit délivrer un couple important, plus le rotor glisse.

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s}$$

## Fonctionnement à vide

A vide le moteur n'entraîne pas de charge  $\Rightarrow$  le glissement est nul est le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

$$\text{A vide : } \mathbf{g = 0} \quad \Rightarrow \quad \mathbf{n = n_s} \quad (\Omega = \Omega_s)$$

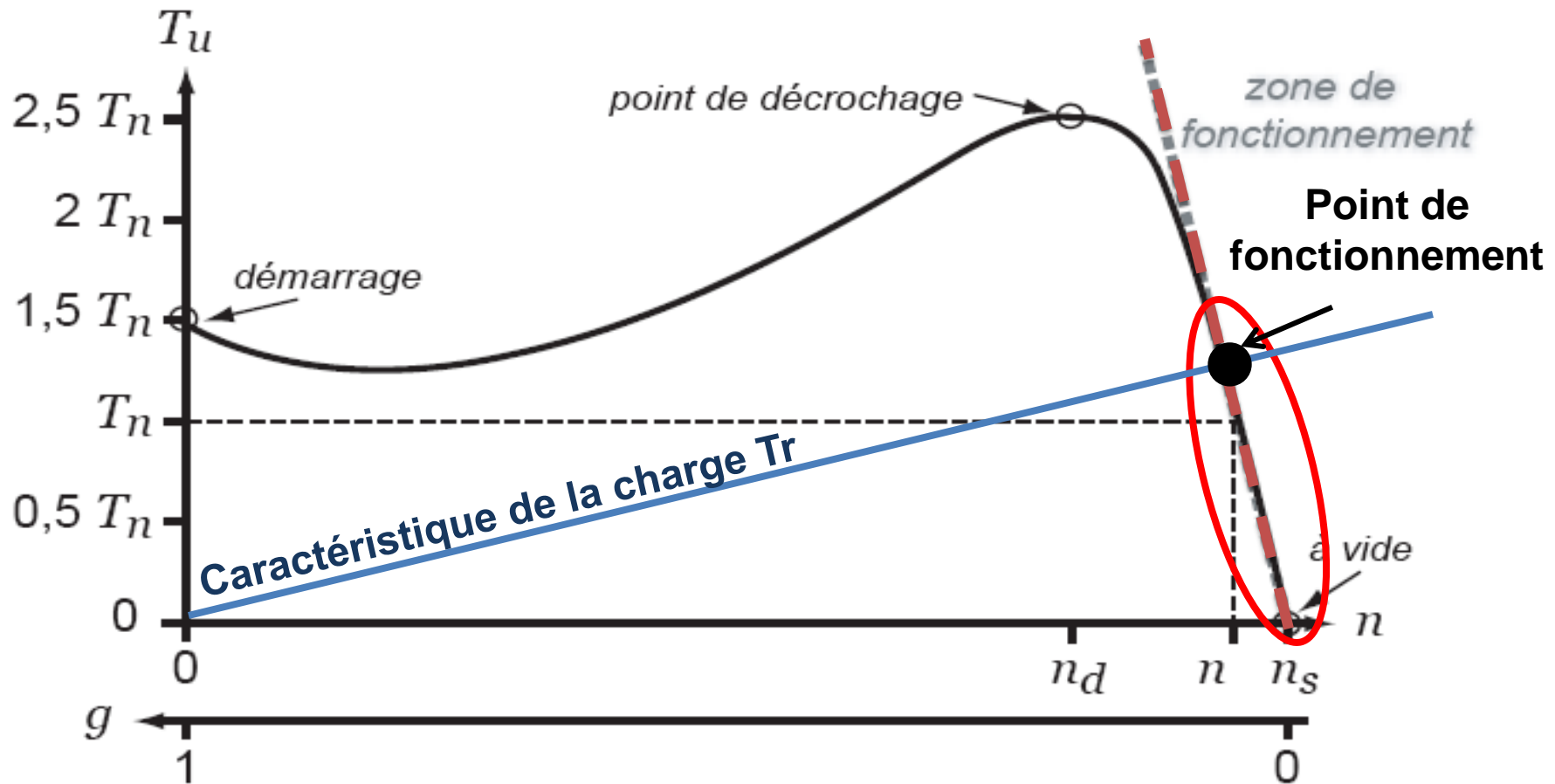
## Fonctionnement en charge

Lorsque l'on charge le moteur, c'est à dire lorsqu'on lui demande de fournir un effort mécanique, la consommation de puissance active augmente et le stator absorbe un courant actif.

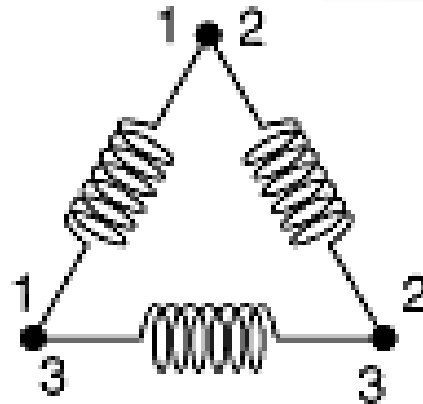
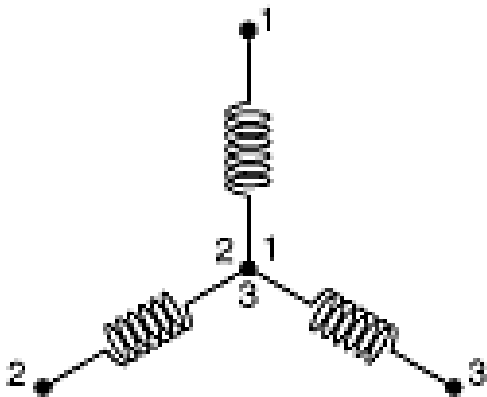
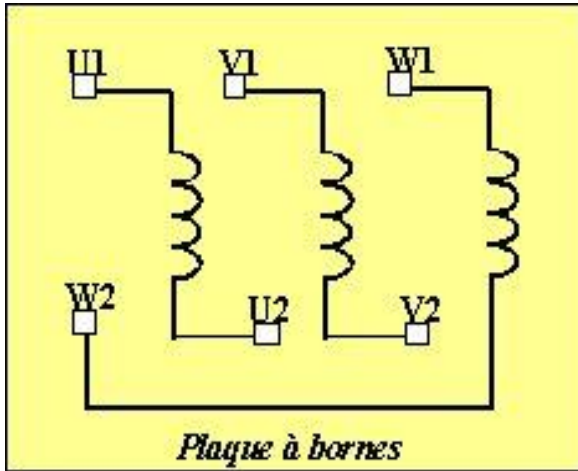
**Remarque :** Le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge

## Caractéristiques mécaniques

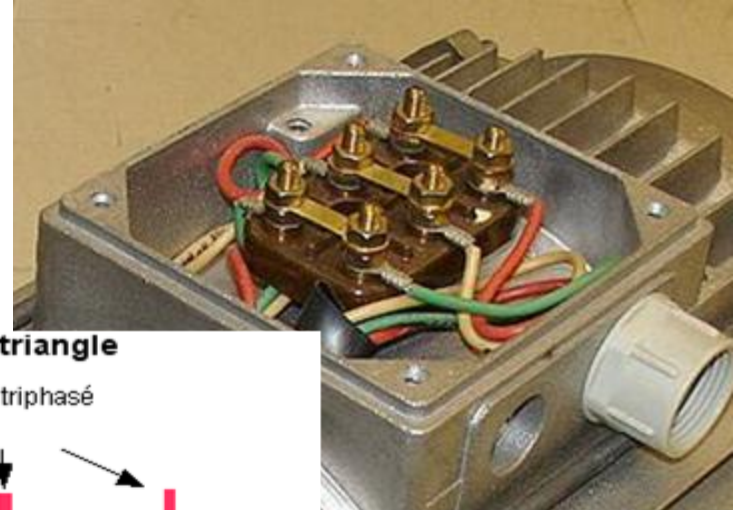
$$T_u = a \cdot n + b$$



# COUPLAGE

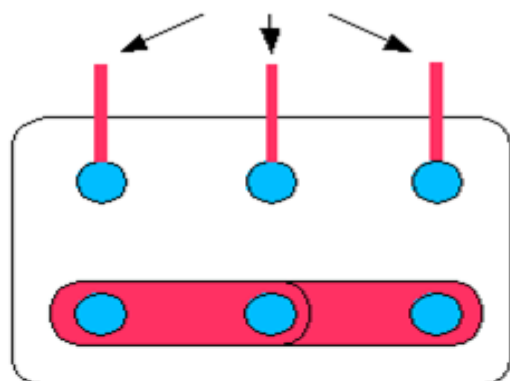


# Le couplage



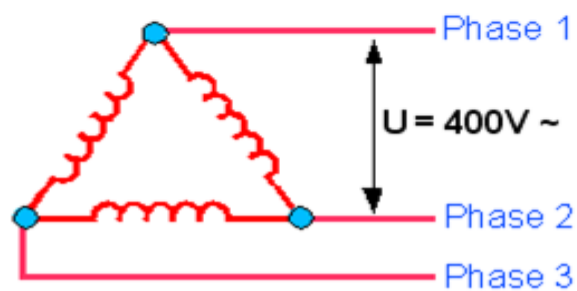
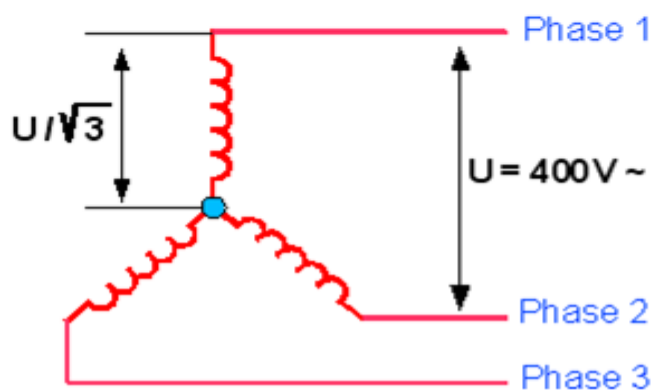
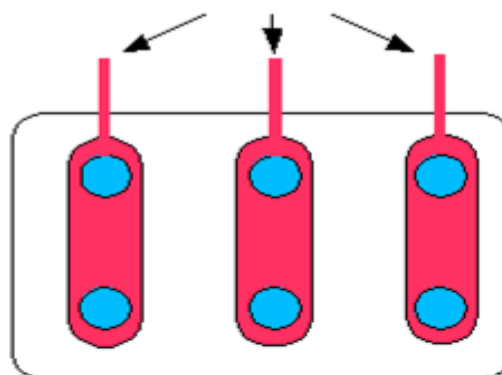
**Montage étoile**

Réseau triphasé



**Montage triangle**

Réseau triphasé



# COUPLAGE

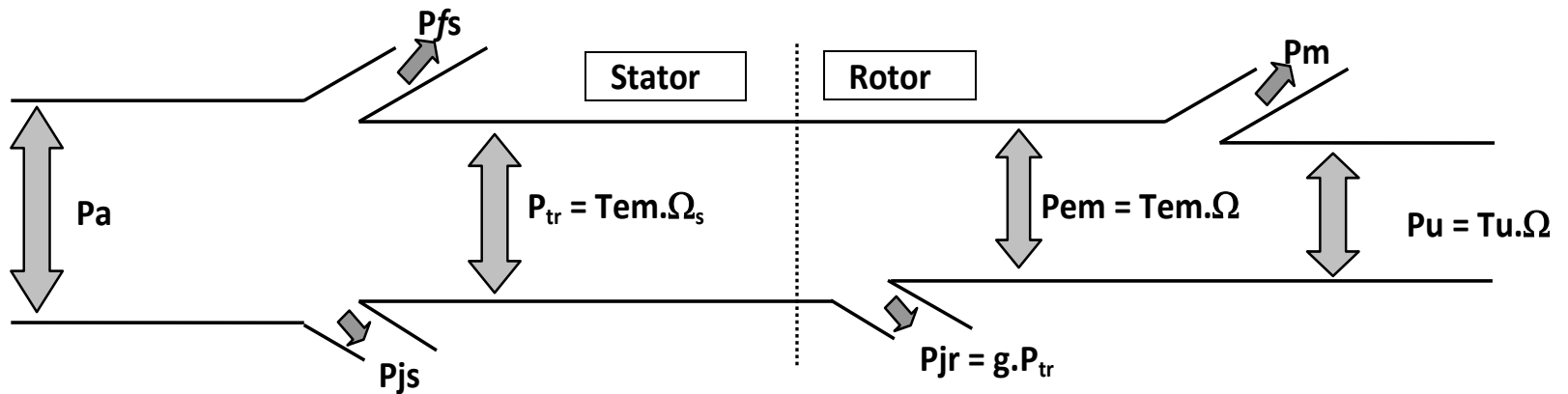
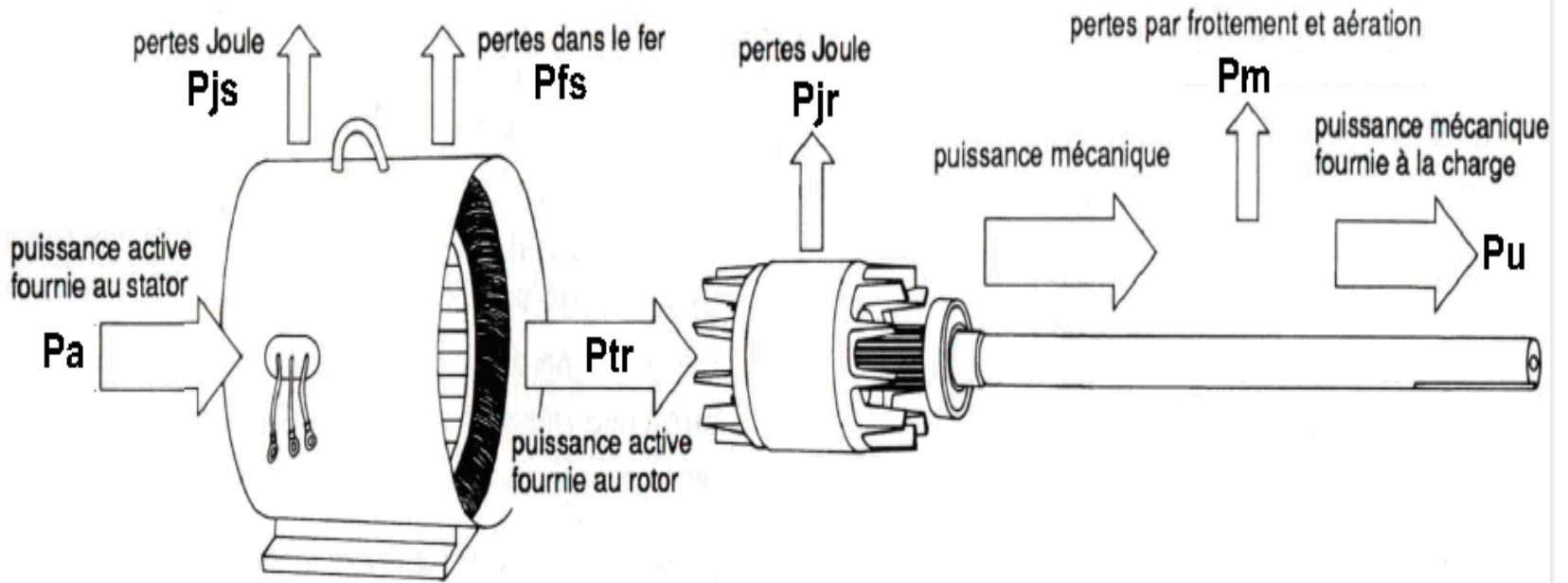
La plus petite tension inscrite sur la plaque signalétique du moteur doit se retrouver aux bornes d'un enroulement. Suivant le réseau triphasé utilisé, le couplage sera en étoile ou en triangle.

## Exemples :

Réseau 3~	Moteur 127V/230 V	Moteur 230V/400V	Moteur 400V/660 V
127 V/230V			
230 V/400 V			
400 V/660 V			

**REGLE:** Si la petite tension du moteur (c'est à dire la tension max supportée par un enroulement du stator) est égale à la tension simple du réseau, le stator sera couplé en étoile , et si elle correspond à la tension composée du réseau, on couple le stator en triangle.





**Rendement**  $\eta = P_u / P_a$

## Détermination des pertes constantes

Les **pertes constantes**  $P_c$ , aussi appelées **pertes collectives**, regroupent les pertes fer et les pertes rotationnelles. Pour les déterminer, on réalise **un essai à vide**.

$$P_{u0} = P_{a0} - P_{JSo} - P_c - P_{JR0}$$

Or, à vide, le glissement est nul :  $g_0 = 0$  et donc  $P_{JR0} = 0$ . De plus, toujours à vide, le moteur ne délivre pas de puissance utile et donc  $P_{u0} = 0$ .



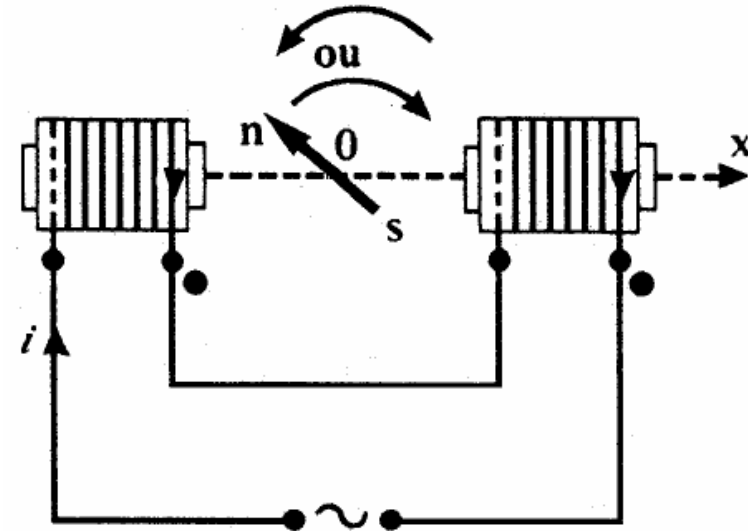
$$P_c = P_{a0} - P_{JSo}$$



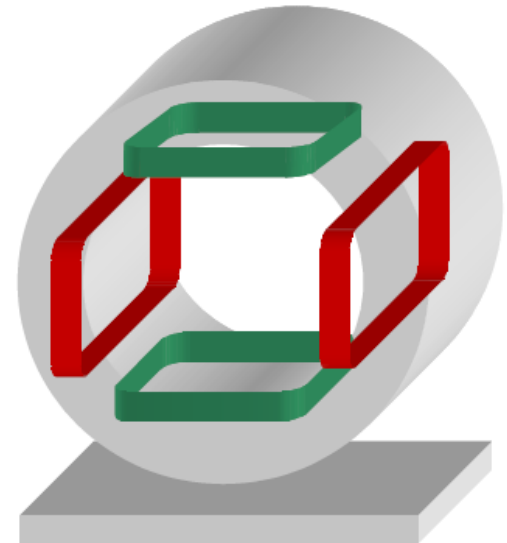
# LE MOTEUR ASYNCHRON MONOPHASE

Ces moteurs sont utilisés dans des applications domestiques (exemple: moteurs de machines à laver)

Un enroulement alimenté par un courant sinusoïdal (système monophasé) produit un champ magnétique équivalent à deux champs tournant en sens inverse :

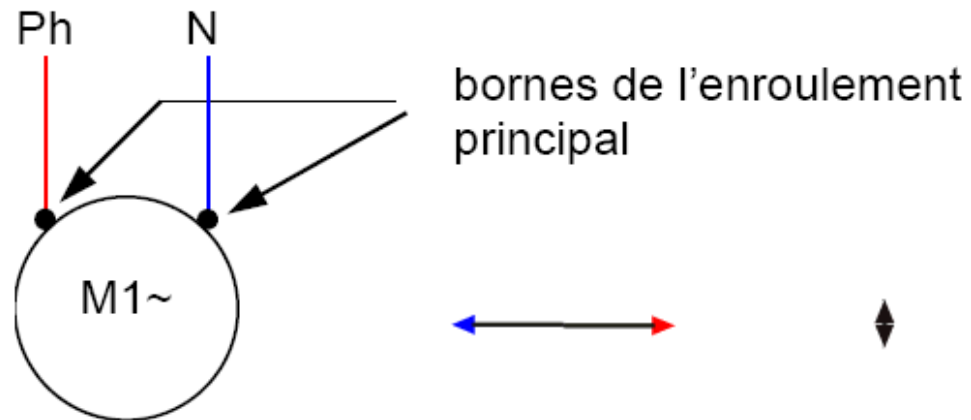


Le bobinage est constitué de deux bobines<sup>4</sup> décalées de  $90^\circ$



**Constitution:** Le moteur monophasé est constitué globalement d'un circuit magnétique et d'un enroulement principal.

Symbole:

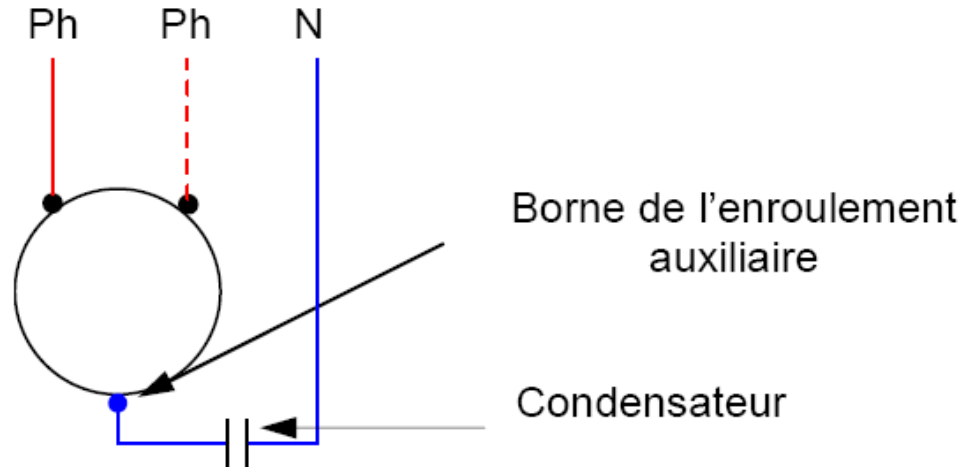


<u>1er essai</u>	Alimentation entre la phase et le neutre de l'enroulement principal du moteur.
<u>Constataction</u>	Le moteur ne démarre pas.
<u>Conclusion</u>	Le moteur asynchrone monophasé ne peut pas démarrer seul. On dit qu'il possède un couple de démarrage nul.
<u>Solution 1</u>	Le moteur doit être entraîné en rotation pour démarrer. 53

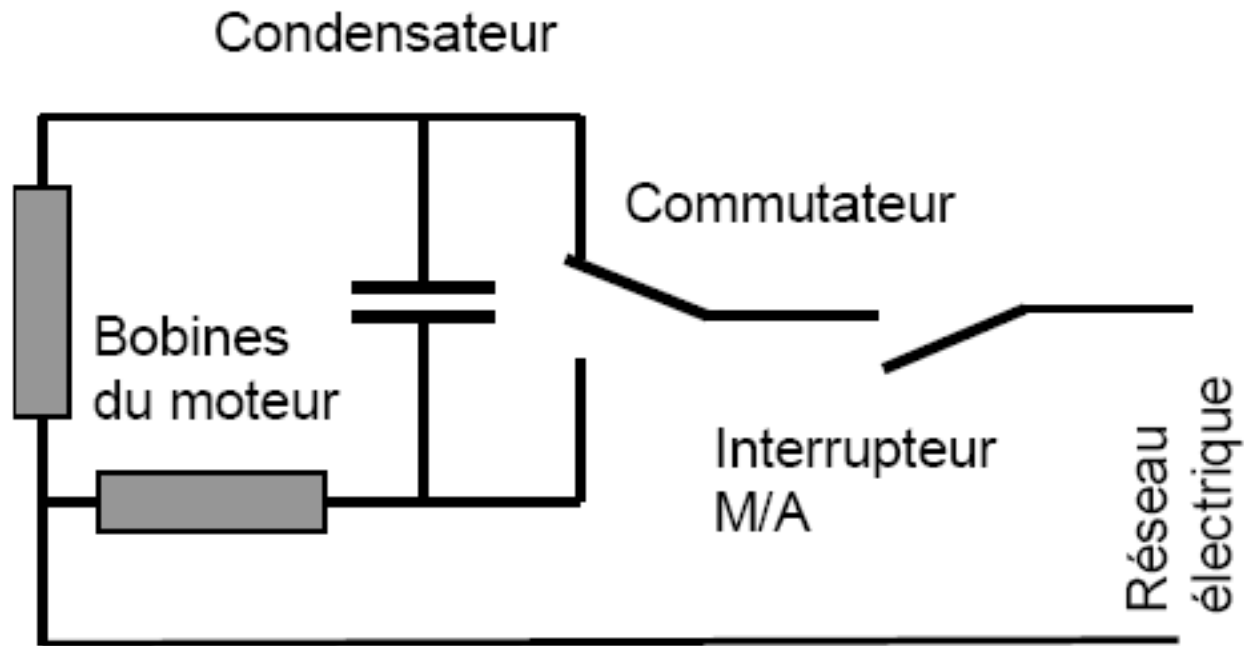
## Constitution du moteur avec artifice de démarrage :

Le moteur est constitué en plus du circuit magnétique et de l'enroulement principal d'un enroulement auxiliaire et d'un condensateur

Symbole:



<u>2è essai</u>	Alimentation entre la phase et le neutre de l'enroulement principal et de l'enroulement auxiliaire.
<u>Constatation</u>	Le moteur démarre .
<u>Conclusion</u>	Le moteur asynchrone monophasé ne peut pas démarrer seul. Il a besoin d'un artifice de démarrage.
<u>Solution 2</u>	Utilisation d'un enroulement auxiliaire et d'un condensateur.



**Le basculement du commutateur permet de changer le sens de rotation du moteur.**

## Single-phase motor rotating field

