Electrotechnique

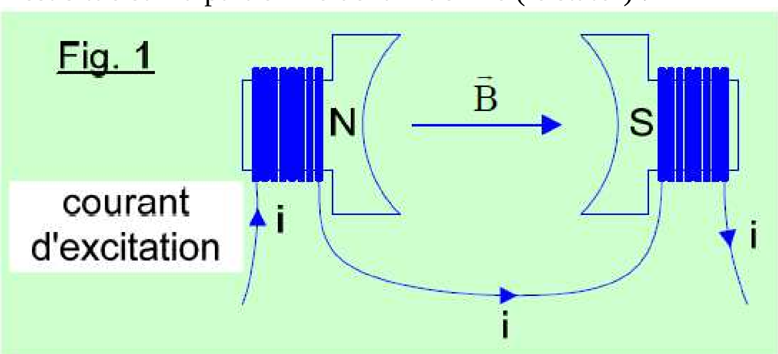
Chapitre 1
Machine à courant continu

1- Constitution

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales :
- l'inducteur
- l'induit
- le dispositif collecteur / balais

1-1- L'inducteur (ou circuit d'excitation)

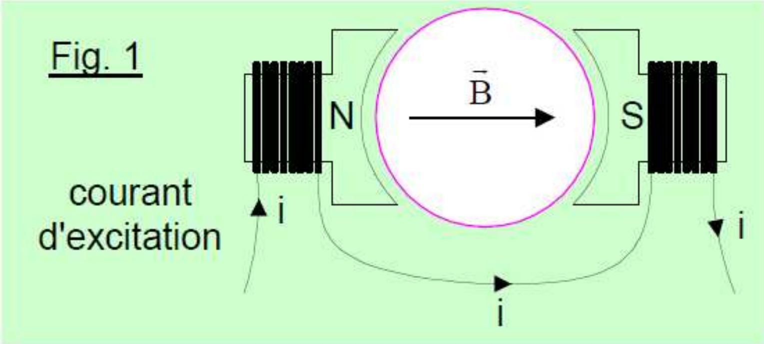
C'est un aimant ou un électroaimant (bobinage parcouru par un courant continu *i*).
Il est situé sur la partie fixe de la machine (le stator) :

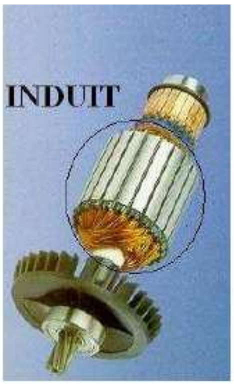


Il sert à créer un champ magnétique (champ "inducteur") dans le rotor.

1-2- L'induit (circuit de puissance)

L'induit est situé au rotor (partie tournante de la machine) :

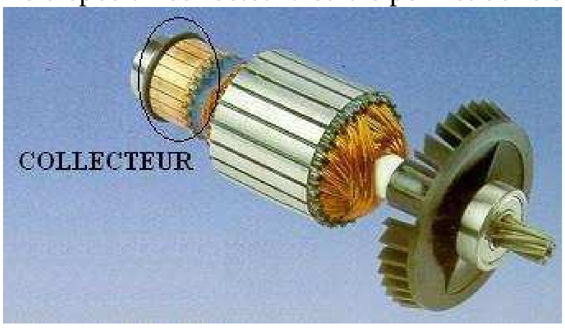




C'est un bobinage parcouru par un courant continu *I* (courant d'induit).

1-3- Le collecteur et les balais

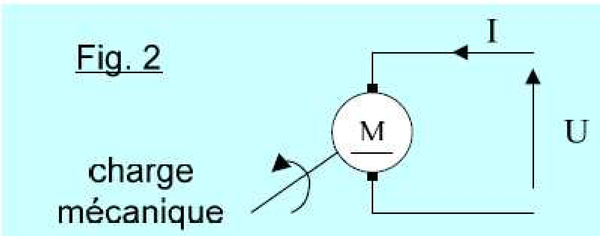
Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit.
Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.
Le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.



2- Principe de fonctionnement

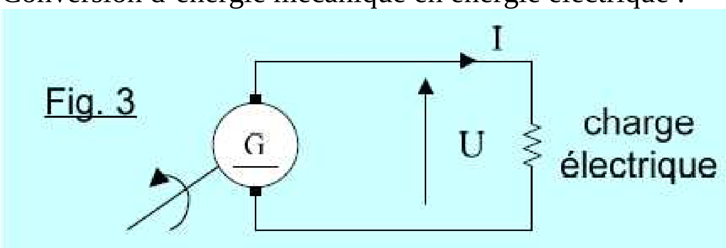
- Fonctionnement en moteur

Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique :



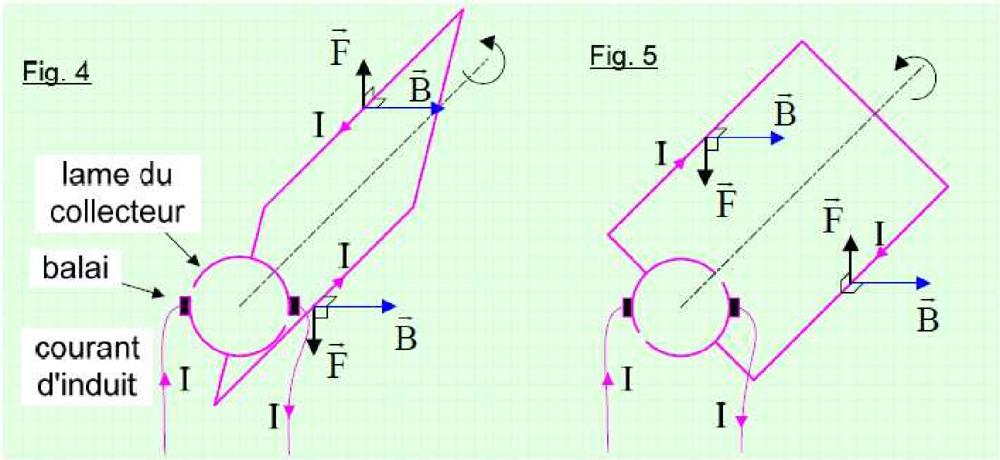
- Fonctionnement en génératrice (dynamo)

Conversion d'énergie mécanique en énergie électrique :



2-1- Fonctionnement en moteur

Soit une spire du bobinage d'induit :



champ magnétique inducteur **B**

\+ courant d'induit **I**

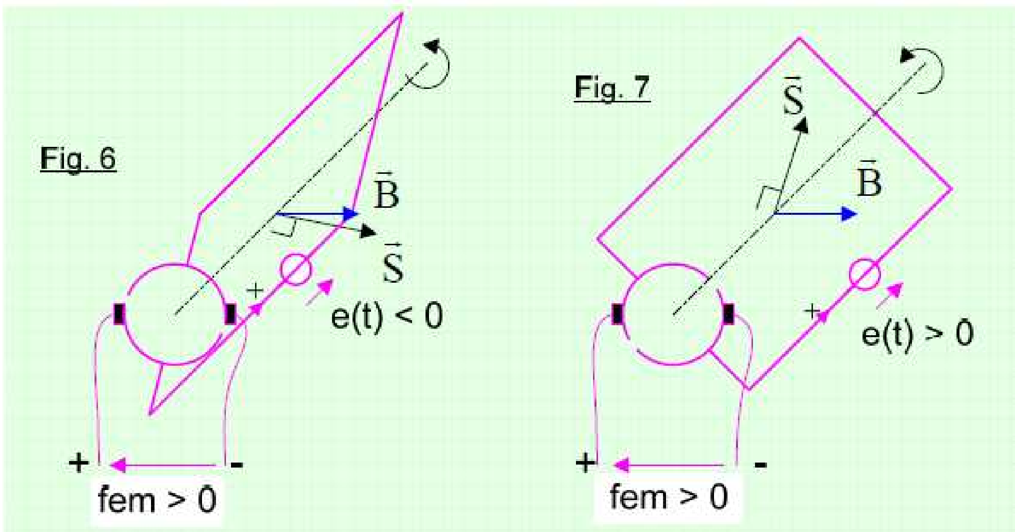
⇒ forces électromagnétiques (forces de Laplace)

⇒ couple électromagnétique

⇒ rotation du rotor

2-2- Fonctionnement en génératrice

Le principe physique utilisé est le phénomène d'induction électromagnétique (loi de Faraday : e = -dΦ/dt) :



champ inducteur + rotation de la spire

⇒ variation du flux magnétique $\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S}$

⇒ création d'une fem induite (e) alternative .

Le collecteur permet d'obtenir une fem de forme continue.

• Remarque

La machine à courant continu est réversible :

elle fonctionne aussi bien en moteur qu'en génératrice.

3- Schéma électrique équivalent

Les matériaux ferromagnétiques de la machine sont supposés linéaires (pas de saturation).

3-1- Expression de la fem induite

Loi de Faraday : **$E = k\,\Phi\,\Omega$**

E : fem induite (tension continue en V)

Φ : flux magnétique crée sous un pôle par l'inducteur (cf. fig. 1)

Ω : vitesse de rotation (en rad/s)

k : constante qui dépend de la machine considérée

3-2- Expression du couple électromagnétique

Loi de Laplace : **$Tem = k'\,\Phi\,I$**

Tem : couple électromagnétique (en Nm)

I : courant d'induit (en A)

k' : constante qui dépend de la machine

3-3- Conversion de puissance

La puissance électromagnétique Pem mise en jeu a deux formes :

- électrique **$Pem = E\,I$**
- mécanique **$Pem = Tem\,\Omega$**

Il vient : $E\,I = Tem\,\Omega$

$(k\,\Omega\,\Phi)\,I = (k'\,\Phi\,I)\,\Omega$

$k = k'$

En résumé :

$$\boxed{\begin{array}{l} E = k\,\Phi\,\Omega \\ T_{em} = k\,\Phi\,I \end{array}}$$

3-4- Flux magnétique crée sous un pôle

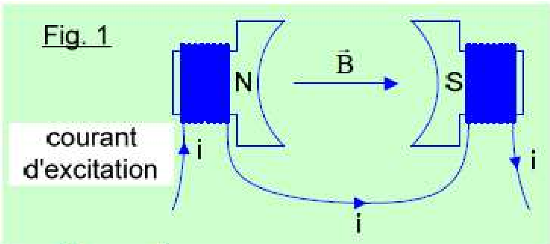
$B \propto i$

$\Phi \propto B$ (par définition)

$\Rightarrow$ le flux est proportionnel au courant d'excitation : **$\Phi \propto i$**

- La fem est donc proportionnelle :

- au courant d'excitation
- à la vitesse de rotation



$E \propto i\,\Omega$

- Le couple électromagnétique est proportionnel :

- au courant d'excitation
- au courant d'induit

$Tem \propto i\,I$

- Cas particulier : inducteur à aimants permanents

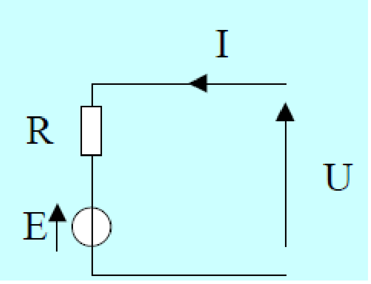
Flux constant $\Rightarrow E \propto \Omega$

Application : mesure de vitesse de rotation (dynamo tachymétrique).

3-5- Schéma équivalent de l'induit

On utilise un modèle de Thévenin :

Fig. 8

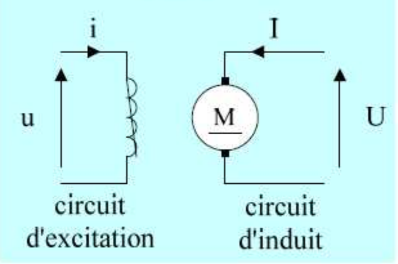


E : fem induite (en V)
U : tension d'induit (en V)
R : résistance d'induit (en Ω) (résistance du bobinage de l'induit)
I : courant d'induit (en A)
Loi des branches : $U = E + RI$ (en convention récepteur)
Fonctionnement :
- en moteur : $I > 0$ $Pe = UI > 0$ $E < U$
- en génératrice : $I < 0$ $Pe = UI < 0$ $U < E$

4- Les différents types de machines à courant continu

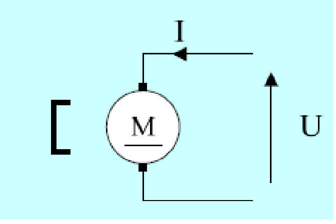
- Machine à excitation indépendante

Fig. 9



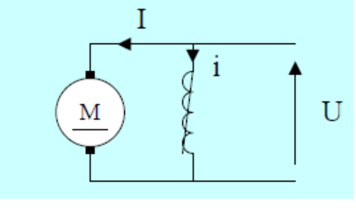
- Machine à aimants permanents

Fig. 10



- Machine shunt (excitation en dérivation)

Fig. 11



- Machine à excitation en série

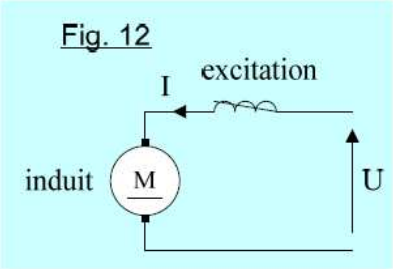


Fig. 12

- Machine compound (excitation composée)

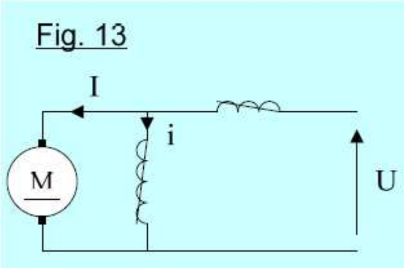


Fig. 13

5- Moteur à excitation indépendante

On s'intéresse à la machine à excitation indépendante en fonctionnement moteur :

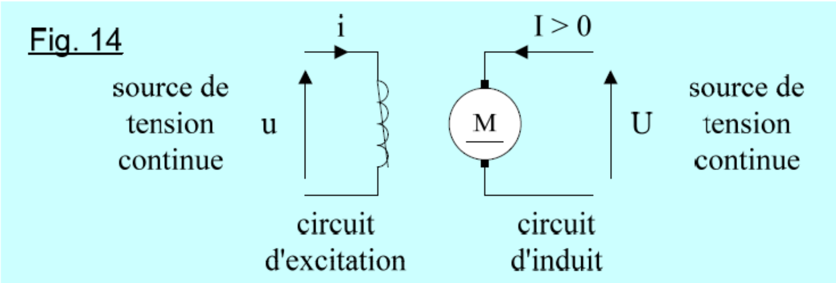


Fig. 14

• Schéma électrique équivalent

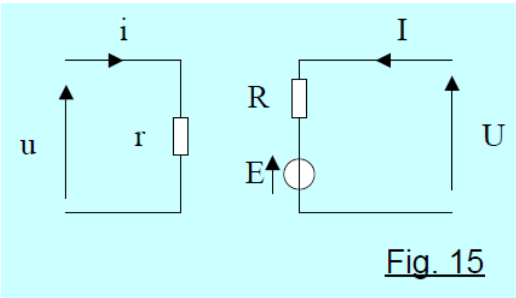


Fig. 15

Induit : U = E + RI
Excitation : u = r i (r : résistance du bobinage de l'excitation)
En pratique : r >> R
En charge : I >> i

• Vitesse de rotation

E = k Φ Ω d'où : $\boxed{\Omega = \dfrac{U - RI}{k\Phi}}$

• Caractéristique Ω(i) à U constante

Charge ↗ courant d'induit I ↗

En pratique : RI << U

$$\Omega \approx \frac{U}{k\Phi}$$

Φ α i

Finalement :

$$\boxed{\Omega \,\alpha\, \frac{1}{i}}$$

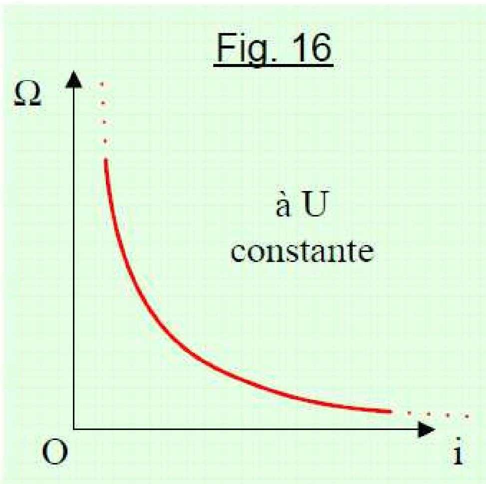


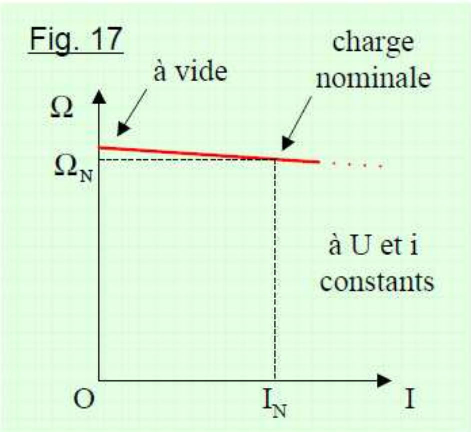
Fig. 16

Si on coupe accidentellement le courant d'excitation (i = 0),
la vitesse augmente très rapidement :
le moteur s'emballe !

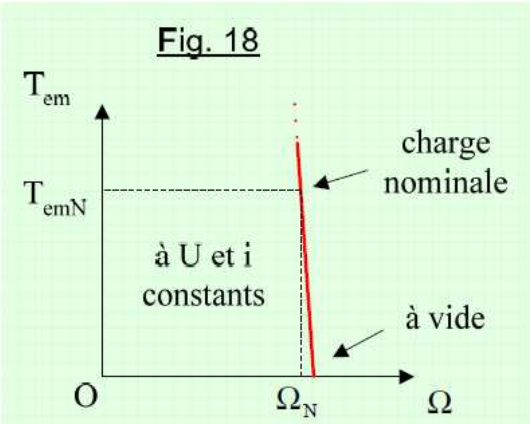
En marche, il ne faut jamais couper l'excitation d'un moteur à excitation indépendante.

• Caractéristique Ω(I) en charge
à U constante et i constant (Φ constant)
Charge ↗ courant d'induit I ↗ et vitesse de rotation ↘

$$\Omega = \frac{U - RI}{k\Phi}$$



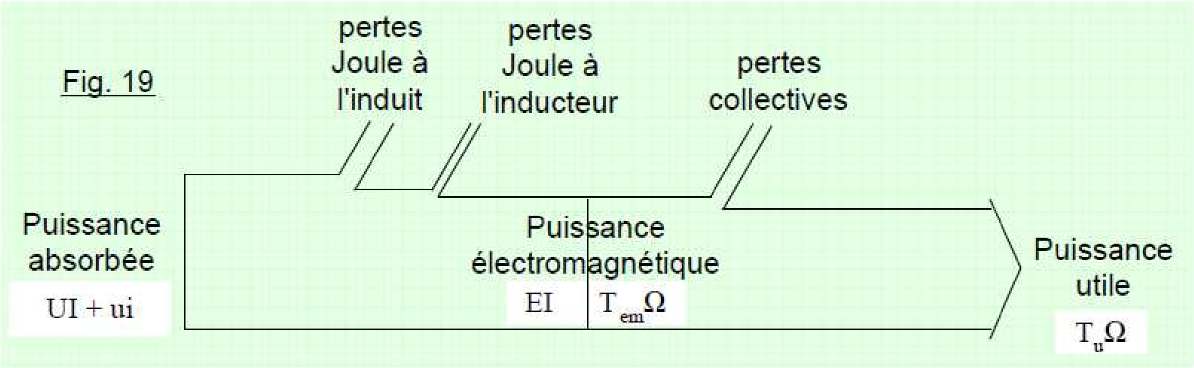
La vitesse de rotation varie peu avec la charge
• Caractéristique mécanique Tem(Ω) à U constante et i constant



Le couple de démarrage (Ω = 0) est important.
Le moteur démarre seul
• Variation de vitesse

$$\Omega \approx \frac{U}{k\Phi}$$

A excitation constante : **Ω α U**
En faisant varier U, on travaille sur une large plage de vitesse de rotation .
• Bilan de puissance



- Puissance absorbée (électrique) : UI (induit) + ui (inducteur)
- Puissance électromagnétique : EI = Tem Ω
- Puissance utile (mécanique) : Tutile Ω

• Rendement

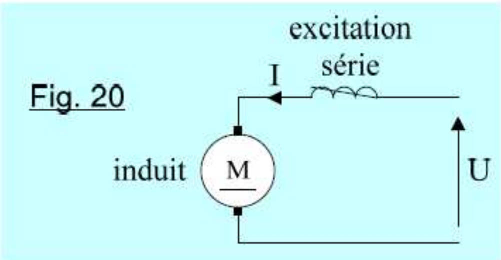
$$\boxed{\eta = \frac{P_{utile}}{P_{absorbée}}}$$

$$\boxed{\eta = \frac{P_{absorbée} - \sum pertes}{P_{absorbée}} = \frac{P_{utile}}{P_{utile} + \sum pertes}}$$

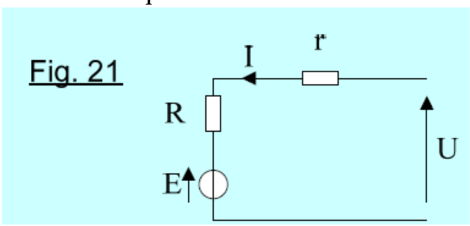
- pertes Joule :
  - à l'induit : RI²
  - à l'inducteur : ri² (= ui)
- pertes collectives (ou "constantes") :
  pertes mécaniques (frottements, vibrations, ventilation …)
  + pertes "fer" (dues aux matériaux ferromagnétiques)

pcollectives = Tpertes collectives Ω
Tpertes collectives = Tem - Tutile

6- Moteur série



• Schéma équivalent



U = E + Rtotale I avec : Rtotale = r + R

• Avantages du moteur série

Tem α I²

⇒ couple important (en particulier au démarrage).

Le moteur série fonctionne aussi en courant alternatif (moteur universel).

• Inconvénients

La vitesse de rotation dépend fortement de la charge :

elle augmente rapidement quand la charge diminue.

A vide, $I \approx 0$

$E \approx U$

$E \propto I\,\Omega \Longrightarrow \Omega \to \infty$

Ce moteur doit toujours avoir une charge car à vide il s'emballe !

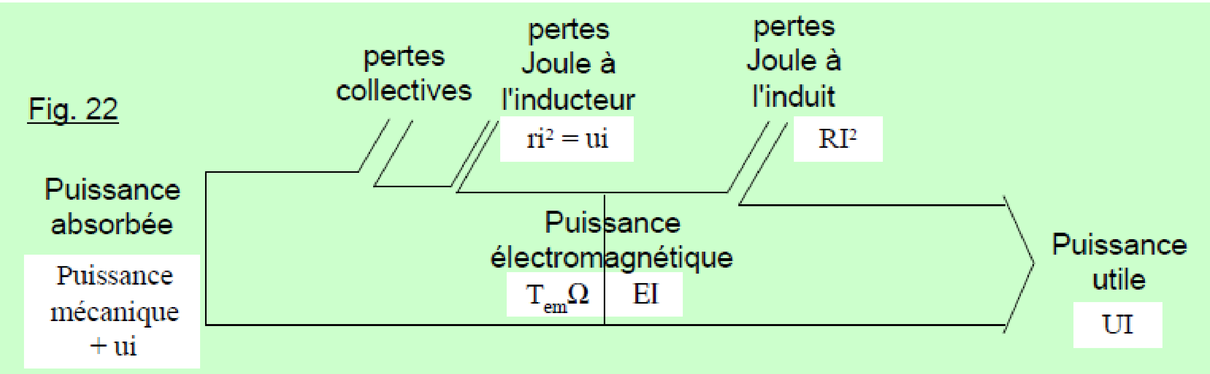
• Applications pratiques

Le moteur série est intéressant quand la charge impose d'avoir un gros couple, au démarrage et à faible vitesse de rotation.

- démarreur (automobile ...)
- moteur de traction (locomotive, métro ...)
- appareils de levage ...

7- Génératrice à courant continu (dynamo)

• Bilan de puissance de la génératrice à excitation indépendante



- Puissance absorbée :

puissance mécanique reçue + puissance consommée par l'inducteur : $ui = ri^2$

- Puissance utile (électrique) : UI (induit)

• Rendement :

$$\boxed{\eta = \frac{UI}{P_{\text{mécanique}} + ui}}$$

Chapitre 2
Puissances électriques en régime sinusoïdal

1- Puissances

• Puissance instantanée

Soit un dipôle quelconque :

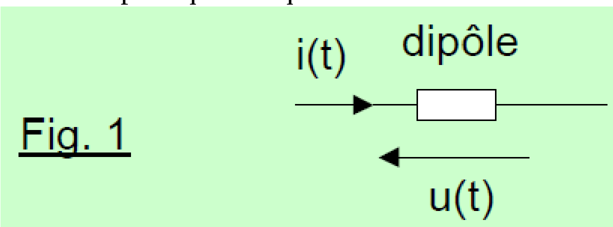


Fig. 1

A l'intant t : $p(t) = u(t)\ i(t)$ [W] = [V][A]

• Puissance "active" P (en watt)

La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée :

P = <p(t)>

Pour un dipôle linéaire en régime sinusoïdal :

$$\boxed{P = U_{eff} I_{eff} \cos \varphi}$$

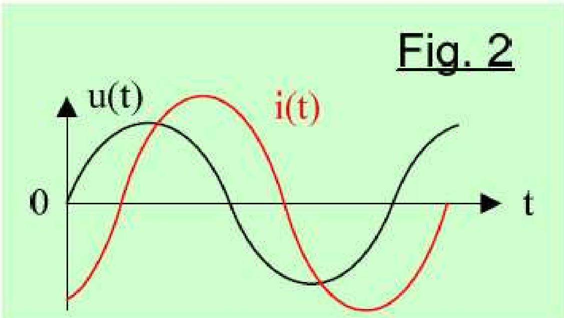


Fig. 2

Ueff : valeur efficace de la tension (en V)

Ieff : " " du courant (en A)

φ : déphasage entre la tension et le courant (φu/i)

• Puissance "réactive" Q (en var : voltampère réactif)

Pour un dipôle linéaire en régime sinusoïdal :

$$\boxed{Q = U_{eff} I_{eff} \sin \varphi}$$

• Puissance "apparente" S (en VA : voltampère)

$$\boxed{S = U_{eff} I_{eff}}$$

Remarque : S est positive.

• Relation entre les puissances

$$\boxed{\cos \varphi = \frac{P}{S}} \qquad \boxed{\sin \varphi = \frac{Q}{S}} \qquad \boxed{\tan \varphi = \frac{Q}{P}}$$

$\cos^2\varphi + \sin^2\varphi = 1$:

$$\boxed{S = \sqrt{P^2 + Q^2}}$$

En résumé : triangle des puissances

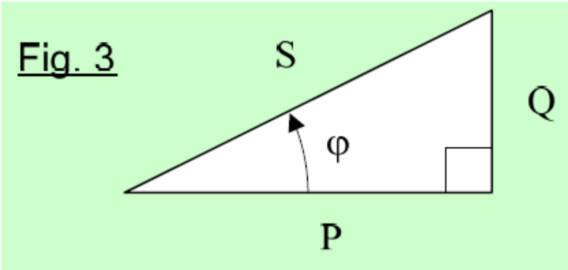


Fig. 3

• Puissances consommées par les dipôles passifs élémentaires (en convention récepteur)

- résistance R (en Ω)

déphasage nul : $\varphi = 0$

$P = UI \cos \varphi = UI$

Loi d'Ohm : $U = RI$

$P = RI^2$ (loi de Joule)

$Q = UI \sin \varphi = 0$ var

Une résistance ne consomme pas de puissance réactive.

- bobine parfaite d'inductance L (en henry)

$\varphi = +90°$

$P = 0$ W

La bobine ne consomme pas de puissance active.

$Q = UI \sin \varphi = UI$

Loi d'Ohm : $U = ZI$ avec : $Z = L\omega$

$Q = +L\omega I^2 > 0$

La bobine consomme de la puissance réactive.

- condensateur parfait de capacité C (en farad)

$\varphi = -90°$

$P = 0$ W

Le condensateur ne consomme pas de puissance active.

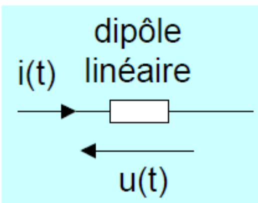
$Q = -UI$

Impédance : $Z = 1/(C\omega)$

$Q = -I^2/(C\omega) < 0$

Le condensateur est un générateur de puissance réactive.

2- Vecteurs de Fresnel et puissances



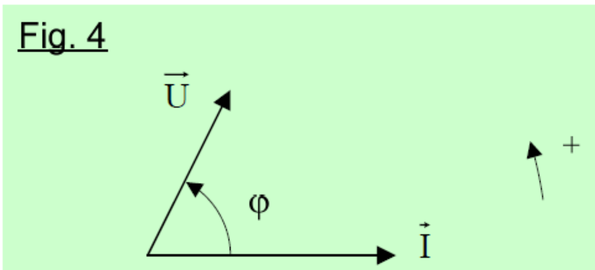


Fig. 4

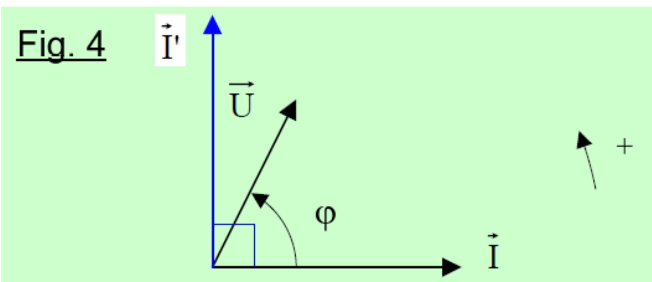


Fig. 4

$$P = \vec{U} \cdot \vec{I}$$
$$Q = \vec{U} \cdot \vec{I}'$$
$$S = \left\|\vec{U}\right\| \left\|\vec{I}\right\|$$

3- Nombres complexes et puissances

• Puissance apparente complexe : $\underline{S} = \underline{U}\ \underline{I}^*$

$\underline{U} = (U, \varphi u)$: nombre complexe associé à la tension

$\underline{I} = (I, \varphi i)$ " " au courant

$\underline{I}^*$ désigne le conjugué de $\underline{I}$

$\underline{S} = \underline{U}\ \underline{I}^* = (UI, \varphi u - \varphi i) = (S, \varphi)$

S est le module de $\underline{S}$

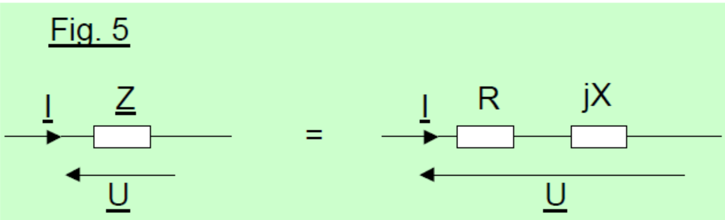
P est la partie réelle de $\underline{S}$

Q est la partie imaginaire de $\underline{S}$

En définitive : $\underline{S} = P + jQ$

• Application : puissances des dipôles passifs linéaires

En régime sinusoïdal, un dipôle passif linéaire est caractérisé par son impédance complexe :



$\underline{Z} = R + jX$

Avec :

• R la résistance (en Ω)
• X la réactance (en Ω)

On montre que :

$S = Z\ I^2 = U^2 / Z$

$P = R\ I^2$: Loi de Joule

$Q = X\ I^2$

Remarque : Q et X ont le même signe.

On peut donc classer les dipôles en trois catégories :

$X = 0$ $Q = 0$: dipôle résistif ($\varphi = 0°$)

$X > 0$ $Q > 0$: dipôle inductif ($0° < \varphi < +90°$)

$X < 0$ $Q < 0$: dipôle capacitif ($-90° < \varphi < 0°$)

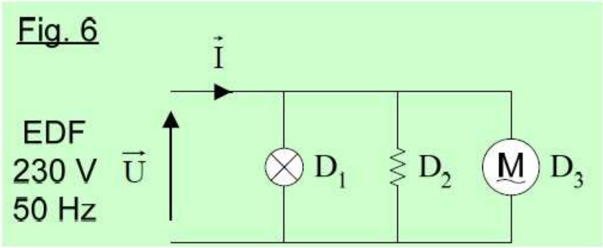
• Cas particulier des dipôles passifs élémentaires

Tableau 1

	Impédance complexe	Résistance	Réactance	P	Q	S
Dipôle passif linéaire	$\underline{Z} = R + jX$	R	X	RI^2	XI^2	$ZI^2 = U^2/Z$
Résistance parfaite	R	R	0	RI^2	0	$RI^2 = U^2/R$
Bobine parfaite	$+jL\omega$	0	$+L\omega$	0	$+L\omega I^2 = +U^2/(L\omega)$	$L\omega I^2 = U^2/(L\omega)$
Condensateur parfait	$-j/(C\omega)$	0	$-1/(C\omega)$	0	$-I^2/(C\omega) = -U^2C\omega$	$I^2/(C\omega) = U^2C\omega$

4- Théorème de Boucherot

Considérons l'association suivante :



Le dipôle Di consomme les puissances :

• active Pi

• et réactive Qi

L'association consomme les puissances active P et réactive Q.

Le théorème de Boucherot traduit la conservation de l'énergie :

$$\boxed{P = \sum_i P_i} \qquad \boxed{Q = \sum_i Q_i}$$

A.N.

Ampoule : P1 = 100 W Q1 ≈ 0 (dipôle résistif)

Radiateur : P2 = 1500 W Q2 ≈ 0 (dipôle résistif)

Aspirateur (moteur universel) :

P3 = 1250 W Q3 = +900 vars (dipôle inductif)

L'installation consomme donc :

P = 2,85 kW

Q = +0,9 kvar

Attention : le théorème de Boucherot ne s'applique pas à la puissance apparente.

$$S \neq \sum_i S_i$$

Il faut utiliser la relation : $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

A.N. S = 2,99 kVA

d'où :

I = S / U =13,0 A

cos φ = P / S = 0,95

5- Facteur de puissance

Définition :

$$\boxed{k = \frac{P}{S} = \frac{\text{puissance active}}{\text{puissance apparente}}}$$

Pour un dipôle linéaire en régime sinusoïdal :

k = cos φ

A noter que : |k| ≤ 1

- dipôle résistif : k = cos 0 = 1

- bobine ou condensateur parfait : k = 0

• **A.N.** Pour l'aspirateur précédent :

$$\cos\varphi_3 = \frac{P_3}{S_3} = \frac{1250}{\sqrt{1250^2 + 900^2}} = 0{,}81$$

0,8 est l'ordre de grandeur du facteur de puissance d'un moteur alternatif en charge.

Chapitre 3
Systèmes triphasés

1- Monophasé (1~) et triphasé (3~)

• système monophasé
- installation domestique

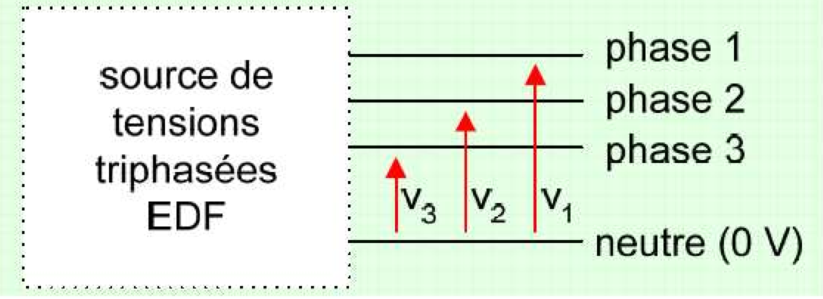
• système triphasé
- installation industrielle
- production, transport et distribution de l'énergie électrique

2- Système triphasé

• Définitions

On appelle ***tensions [courants] triphasées***, trois tensions [courants] sinusoïdales alternatives, de même fréquence, de même valeur efficace et régulièrement déphasées de 120°.

Fig. 1

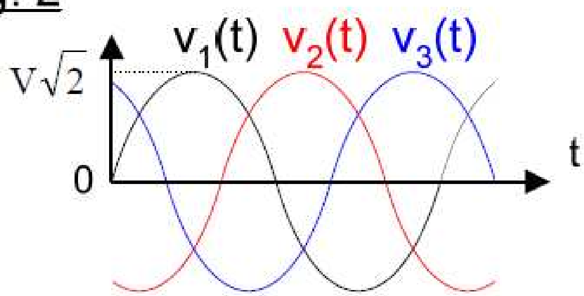


Les tensions vi sont appelées tensions ***entre phase et neutre*** (ou tensions ***simples***).

• Représentation temporelle

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

Fig. 2



V désigne la valeur efficace des tensions simples.

• Représentation de Fresnel

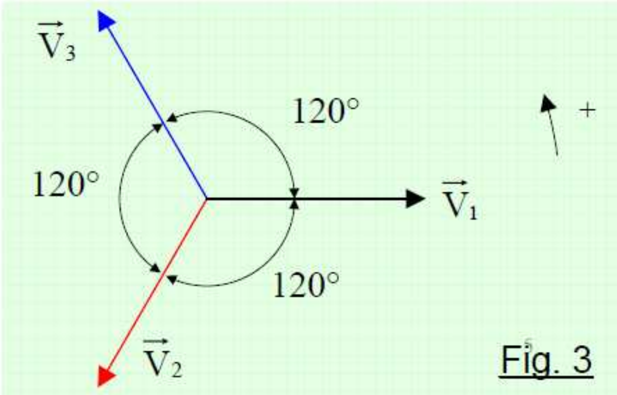


Fig. 3

• Tensions entre phases

Fig. 4

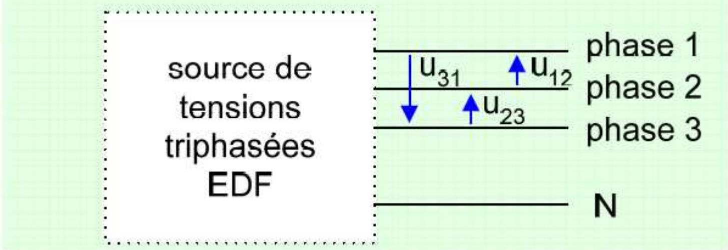
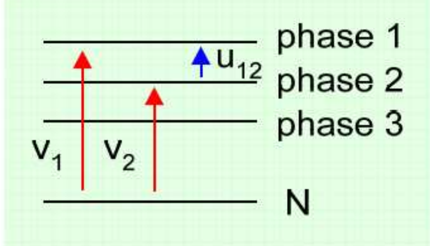


Fig. 4



Les tensions uij sont appelées tensions ***entre phases*** (ou tensions ***composées***).
On note U la valeur efficace des tensions entre phases.

• Relation entre U et V
Loi des branches :
u12 = v1 - v2
u23 = v2 - v3
u31 = v3 - v1

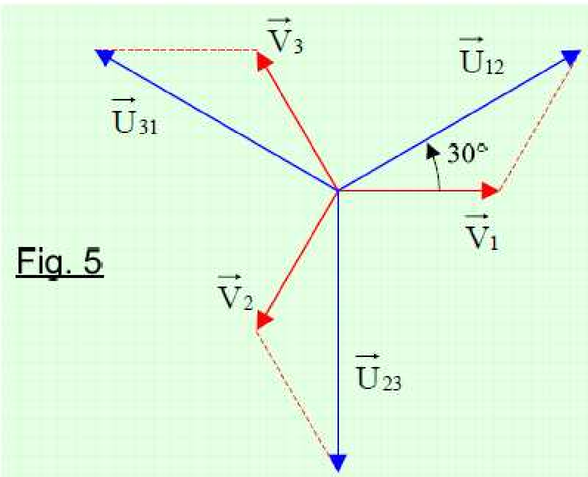


Fig. 5

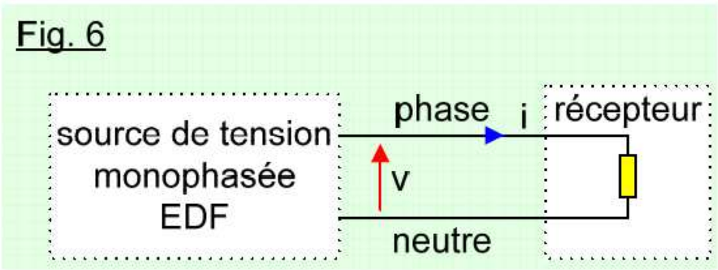
$$\boxed{U = \sqrt{3}V}$$

Remarque :
En France, EDF distribue un réseau triphasé
• 400 V (valeur efficace entre phases)
• 50 Hz
Valeur efficace des tensions simples : $V = \dfrac{U}{\sqrt{3}} = \dfrac{400}{\sqrt{3}} \approx 230\ \text{V}$

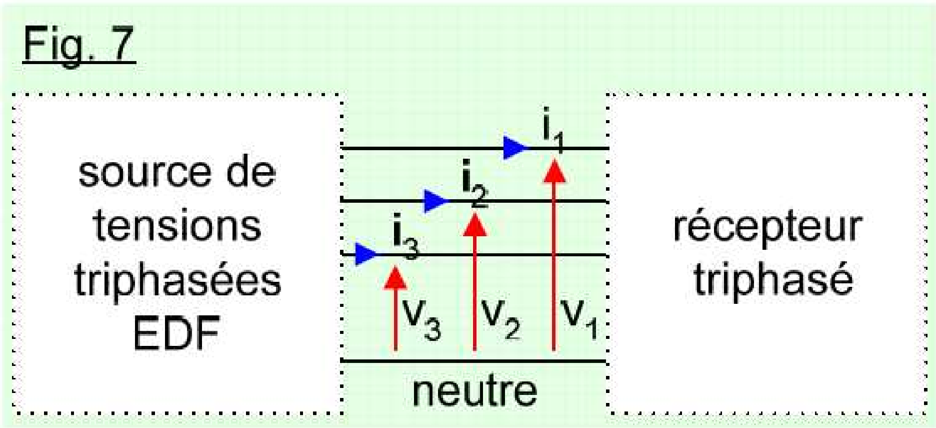
Chez vous, la tension monophasée (le “secteur”) provient d'un réseau triphasé où l'on utilise le neutre avec une des trois phases.

3- Récepteurs triphasés équilibrés

En monophasé, le récepteur est un dipôle.
Une des bornes est reliée au neutre et l'autre à la phase :

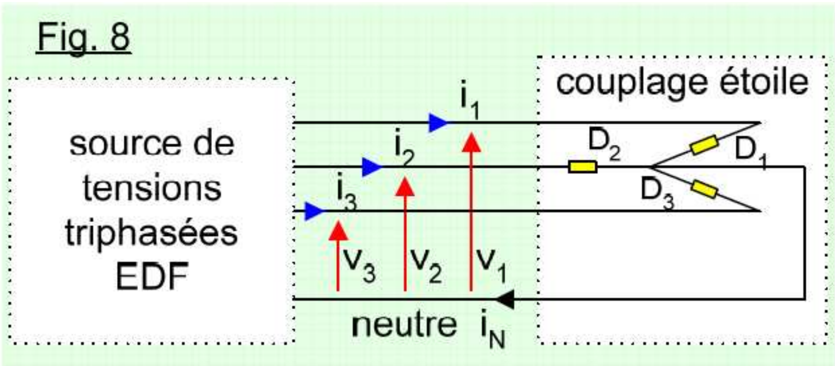


En triphasé, le récepteur possède trois bornes (une par phase) et éventuellement une quatrième pour le neutre :



Les courants i1, i2 et i3 sont appelés courants de ***ligne***.

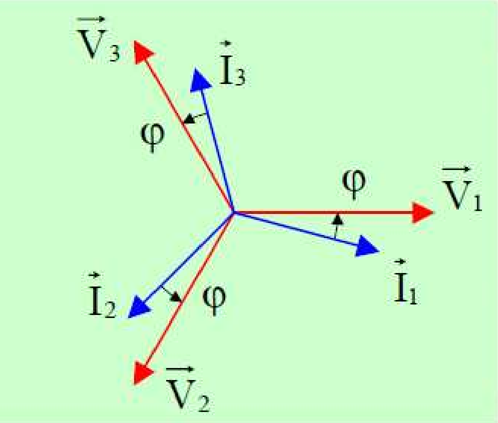
3-1- Couplage étoile (Y) d'un récepteur triphasé



• Définition : un récepteur triphasé est ***équilibré*** s'il est constitué de trois dipôles identiques.
Autrement, on parle de récepteur triphasé déséquilibré.
• Conséquence : dans un récepteur ***linéaire et équilibré***, les courants de ligne forment un système de courants triphasés (mêmes valeurs efficaces **I** et déphasages de 120°).

• Représentation de Fresnel

Fig. 9



La loi des noeuds indique que le courant de neutre est nul :
$i_N(t) = i_1(t) + i_2(t) + i_3(t) = 0$
En pratique : non linéarité, déséquilibre ———> $i_N \neq 0$

• Puissances
Le récepteur triphasé est constitué de trois dipôles consommant les mêmes puissances :
$P_1 = P_2 = P_3 = VI \cos\varphi$
$Q_1 = Q_2 = Q_3 = VI \sin\varphi$

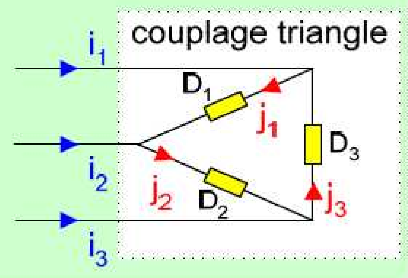
Théorème de Boucherot :
$P = P_1 + P_2 + P_3 = 3VI \cos\varphi$
$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 3VI \sin\varphi$
$S = 3VI$

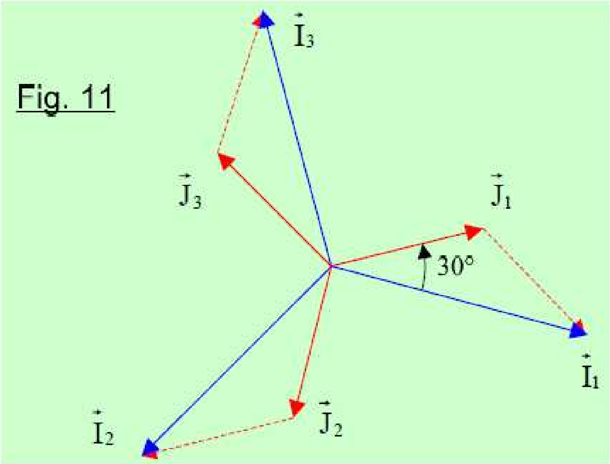
3-2- Couplage triangle (D ou Δ) d'un récepteur triphasé

Pour ce couplage : pas de neutre.
Les courants j1, j2 et j3 sont appelés courants de ***phase***.
Si le récepteur est linéaire et équilibré, les courants de phase forment un système de courants triphasés, de valeurs efficaces **J**.
• Relation entre I et J

$i_1 = j_1 - j_3$
$i_2 = j_2 - j_1$
$i_3 = j_3 - j_2$

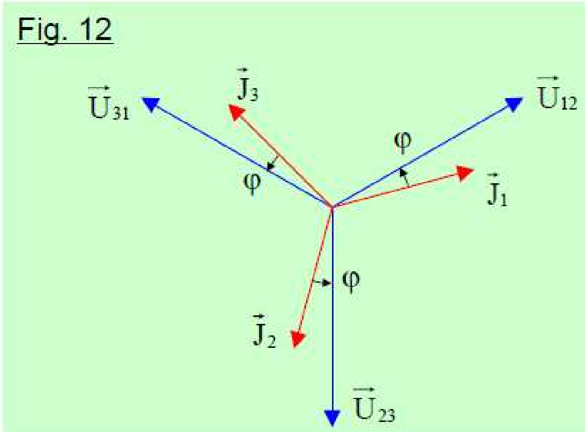
Fig. 10





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

• Puissances



P1= P2 = P3 = UJ cosφ
Q1 = Q2 = Q3= UJ sinφ

Puissances consommées par le récepteur triphasé :
P = 3UJ cosφ
Q = 3UJ sinφ
S = 3UJ

4- Puissances en régime triphasé équilibré

• couplage Y

$$P = 3VI\cos\varphi_{v/i}$$

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

$$P = \sqrt{3}UI\cos\varphi_{v/i}$$

• couplage Δ

$$P = 3UJ\cos\varphi_{u/j}$$

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

$$P = \sqrt{3}UI\cos\varphi_{u/j}$$

$$= \sqrt{3}UI\cos\varphi_{v/i}$$

• Quel que soit le couplage :

$$\boxed{\begin{aligned} P &= \sqrt{3}UI\cos\varphi \\ Q &= \sqrt{3}UI\sin\varphi \\ S &= \sqrt{3}UI \\ k &= \cos\varphi \end{aligned}}$$

Chapitre 4
Transformateur en régime sinusoïdal
1- Introduction
• Constitution
Le transformateur monophasé est constitué de deux enroulements indépendants qui enlacent un circuit magnétique commun :

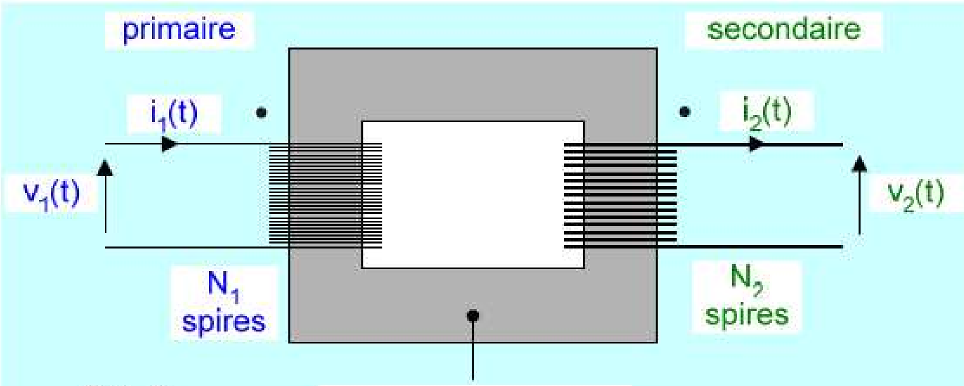
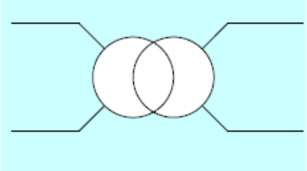


Fig. 1

• Symbole électrique

Fig. 2


• Branchement
L'enroulement ***primaire*** est branché à une source de tension sinusoïdale alternative.
L'enroulement ***secondaire*** alimente une charge électrique :

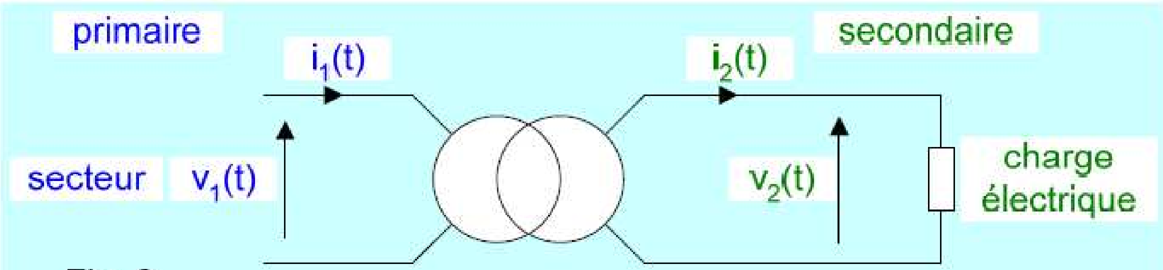


Fig. 3

2- Le transformateur parfait

• Le transformateur utilise le phénomène d'induction électromagnétique.
Loi de Faraday :

$$v_1(t) = -e_1(t) = +N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

$\Phi(t)$ est le flux magnétique canalisé par le circuit magnétique.
Au secondaire :

$$v_2(t) = e_2(t) = +N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

D'où : $$v_2(t) = \frac{N_2}{N_1} v_1(t)$$

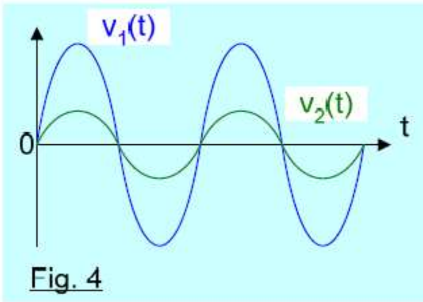


Fig. 4

• Relation entre les valeurs efficaces : $\boxed{\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}}$

• Bilan de puissance du transformateur parfait

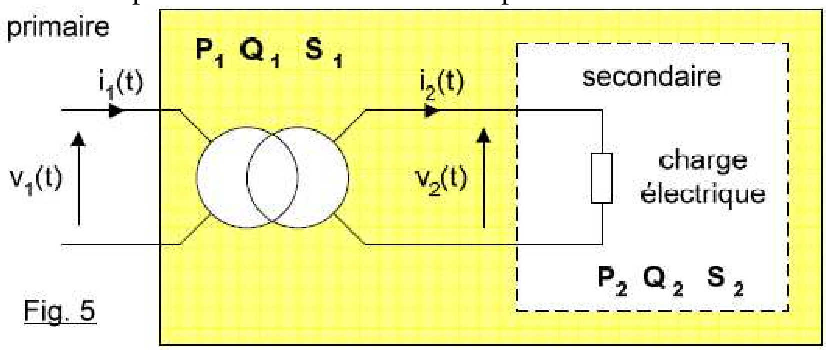


Fig. 5

- pas de pertes : P2 = P1 (rendement de 100 %)
- circuit magnétique parfait : Q2 = Q1

Par conséquent :

S2 = S1
V2I2 = V1 I1

$$\boxed{\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}}$$

Facteur de puissance : cos φ2 = cos φ1
C'est la charge du secondaire qui impose le facteur de puissance.
Ex. : cos φ2 = 1 pour une charge résistive.

3- Transformateur réel

En réalité :

• P2 < P1 : rendement < 1 car :

– pertes Joule dans les enroulements
– pertes fer dans le circuit magnétique
– vibrations

• La magnétisation du circuit magnétique demande un peu de puissance réactive : Q2 < Q1
• A vide (pas de charge au secondaire : I2 = 0) : I1v ≠ 0
• V2 dépend du courant I2 débité dans la charge.

• Définition
Rapport de transformation à vide : $\boxed{m_v = \dfrac{V_{2\text{vide}}}{V_1}}$

En pratique : $m_v = \dfrac{V_{2\text{vide}}}{V_1} \approx \dfrac{N_2}{N_1}$

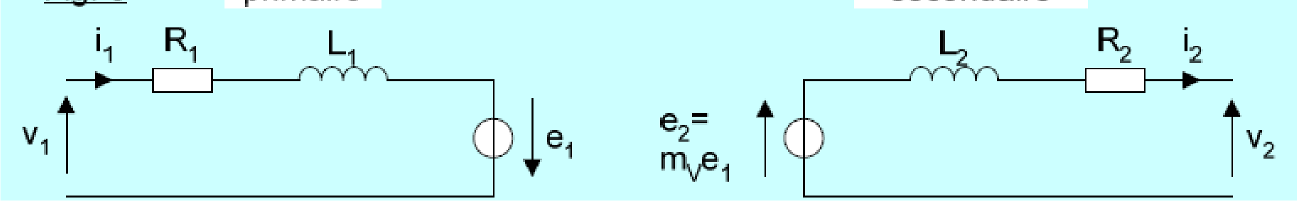
Par la suite, on suppose que : $\boxed{m_v = \dfrac{N_2}{N_1}}$

• Deux grands types de transformateurs :
- élévateur de tension (abaisseur de courant) : mv > 1 N2 > N1
- abaisseur de tension (élévateur de courant) : mv < 1 N2 < N1

4- Schéma équivalent du transformateur réel

On utilise l'hypothèse de Kapp, c'est à dire :
• transformateur parfait pour les courants :
• pas de pertes fer

Fig. 6



R1 : résistance de l'enroulement primaire
R2 : “ “ “ secondaire
L1 : inductance des fuites magnétiques au primaire
L2 : “ “ “ “ “ secondaire

• Schéma équivalent vu du secondaire
On peut résumer les deux schémas précédents en un seul.
Avec la notation complexe :

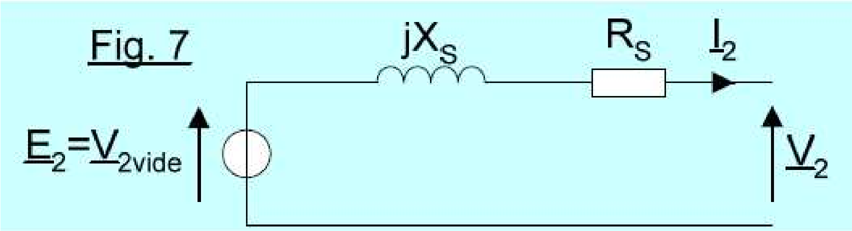


Fig. 7

Rs : résistance des enroulements ramenée au secondaire
Ls : inductance de fuite ramenée au secondaire
Xs = Lsω : réactance de fuite au secondaire
On montre que :

$$\boxed{\begin{aligned} R_s &= R_2 + m_v^2 R_1 \\ L_s &= L_2 + m_v^2 L_1 \end{aligned}}$$

Loi des branches : $\boxed{\underline{V}_2 = \underline{V}_{2vide} - (R_s + jX_s)\underline{I}_2}$

• Diagramme de Kapp
C’est la représentation de Fresnel du schéma équivalent vu du secondaire :

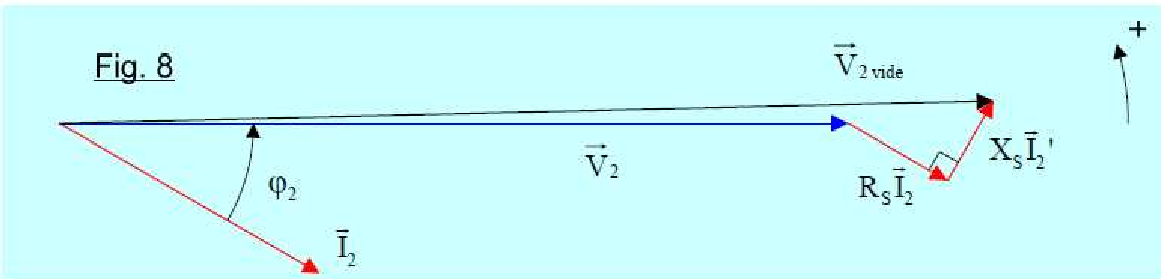


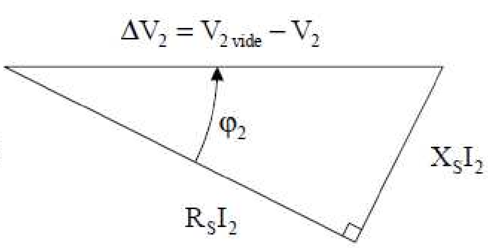
Fig. 8

$$\vec{V}_2 = \vec{V}_{2vide} - (R_s\vec{I}_2 + X_s\vec{I}_2')$$

5- Chute de tension en charge

Par définition, la chute de tension en charge au secondaire est :
ΔV2 = V2vide - V2
En pratique : RsI2 et XsI2 << V2.
On peut faire l'approximation suivante :

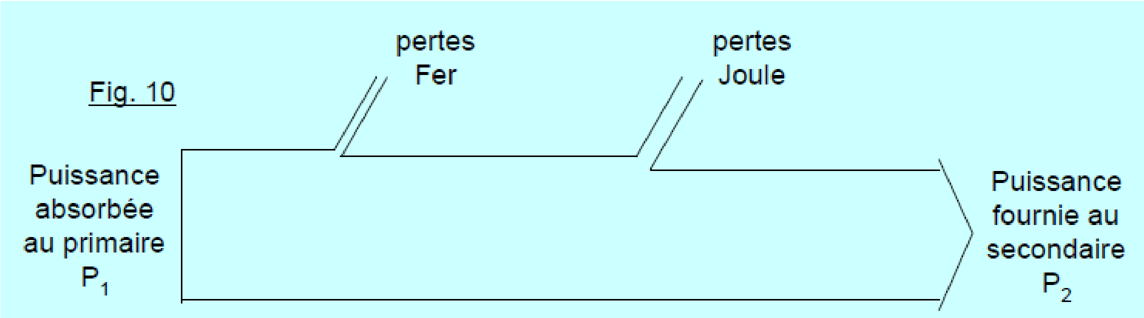
Fig. 9



$$\boxed{\Delta V_2 \approx (R_s \cos\varphi_2 + X_s \sin\varphi_2)\, I_2}$$

La chute de tension :
• est proportionnelle au courant débité
• dépend de la nature de la charge (facteur de puissance)

6- Bilan de puissance



P1 et P2 sont des puissances électriques :
• P1 = V1I1cos φ1
• P2 = V2I2cos φ2

Les pertes ont deux origines :
• électrique
Les pertes Joule (ou pertes ***cuivre***) dans les enroulements :
pJoule = R1I1² + R2I2² = RsI2²
• magnétique
Les pertes fer dans le circuit magnétique dépendent de la tension d'alimentation :
pfer α V1²

• Rendement $$\boxed{\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2 I_2 \cos\varphi_2}{V_2 I_2 \cos\varphi_2 + R_s I_2{}^2 + p_{fer}}}$$

7- Transformateur triphasé

Trois enroulements au primaire (un par phase).
« « au secondaire «
• Rendement

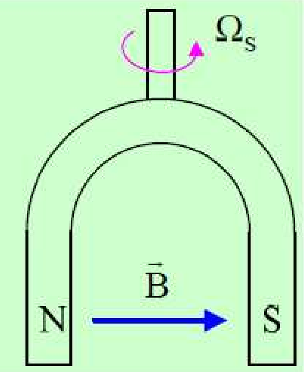
$$\boxed{\eta = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos\varphi_2 + 3 R_s I_2{}^2 + p_{fer}}}$$

• Application : transport et distribution de l'énergie électrique
a) Production : 20 kV (50 Hz)
b) Transport :
20 kV / 400 kV (transfo. élévateur)
400 kV / 225 kV / 90 kV / 63 kV (transfos. abaisseurs)
c) Distribution :
63 kV / 20 kV / 400 V
• Tableau 1

HTB	> 50 kV
HTA	1 à 50 kV
BTB	500 à 1000 V
BTA	50 à 500 V

Chapitre 5
Champ magnétique tournant
1- Champ tournant produit par un aimant

Fig. 1



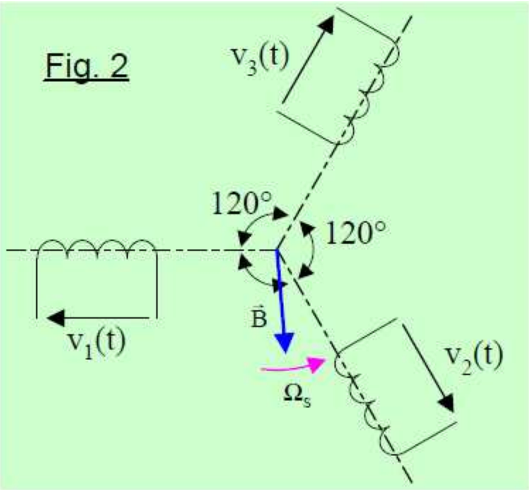
Le champ magnétique “tournant” est caractérisé par sa vitesse de rotation ΩS.

2- Champ tournant produit par un système triphasé

Soit trois bobines alimentées par un système de tensions triphasées :

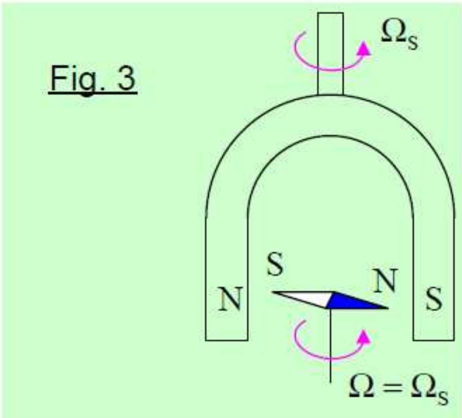
Au centre, le champ magnétique résultant est un champ tournant.
Vitesse de rotation :
$\Omega S = \omega = 2\pi f$

Fig. 2



A.N. f = 50 Hz (fréquence des tensions triphasées)
Le champ magnétique tourne à 50 tr/s ou 314 rad/s.

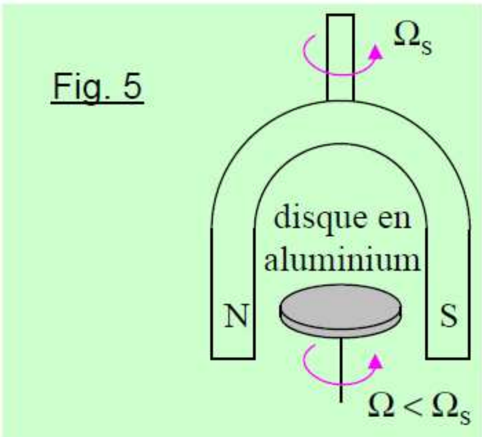
3- Principe de la machine synchrone



Les mouvements de l'aimant et de l'aiguille aimantée sont *synchrones* :
Ω= ΩS
C'est pour cela que ΩS est appelée *vitesse de synchronisme*.

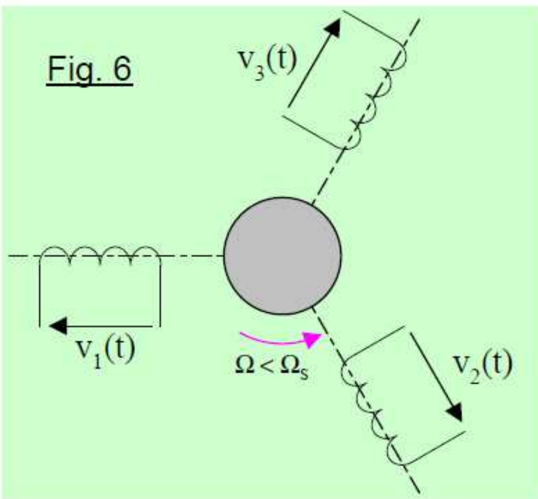
4- Principe de la machine asynchrone

Remplaçons l'aiguille aimantée par un disque conducteur non ferromagnétique :



On constate que le disque tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme.
Les deux mouvements sont *asynchrones*.

• Principe de la machine asynchrone



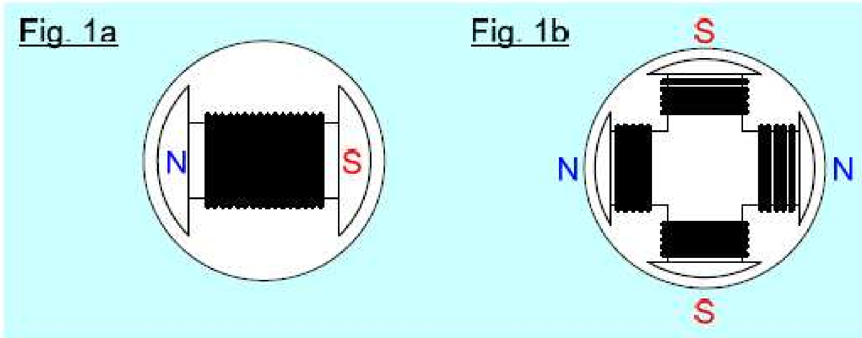
Pour f = 50 Hz, le disque (le rotor) tourne à une vitesse un peu inférieure à 50 tr/s.
C'est le principe de fonctionnement du moteur asynchrone.

Chapitre 6
Machine synchrone triphasée

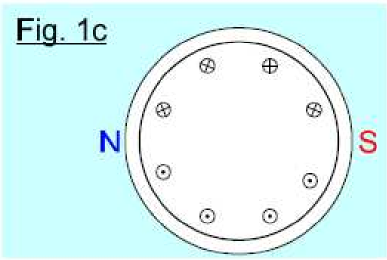
1- Constitution

1-1- Rotor

Au rotor, nous avons l'inducteur (ou excitation). C'est un électroaimant alimenté en courant continu par l'intermédiaire de balais. L'inducteur crée un champ tournant.
Deux grandes catégories de machines synchrones :
- Machines à pôles saillants



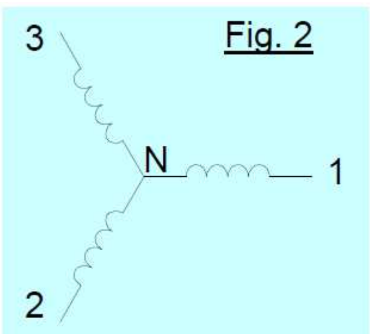
- Machines à pôles lisses



Le rotor est caractérisé par son ***nombre de paires de pôles*** p :
• p = 1 (2 pôles) : fig. 1a 1c
• p = 2 (4 pôles) : fig. 1b

1-2- Stator

Au stator, nous avons l'induit (circuit de puissance).
C'est un bobinage triphasé, généralement couplé en étoile :



2- Types de fonctionnement

2-1- Fonctionnement en moteur

Le moteur alimenté en triphasé tourne :

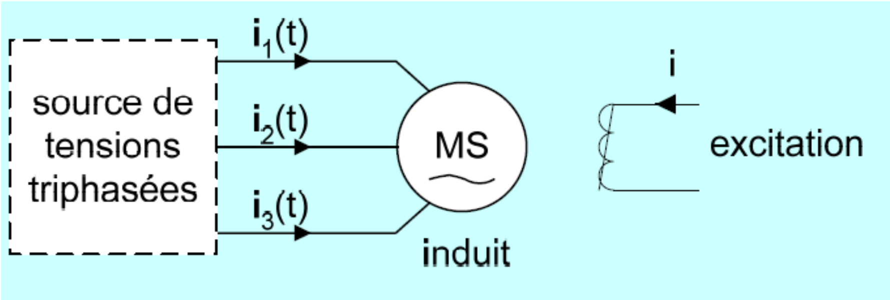


Fig. 3

Ex. moteurs synchrones "autopilotés" des TGV.

2-2- Fonctionnement en génératrice : alternateur

La *génératrice synchrone* est plus connue sous le nom d'*alternateur*.

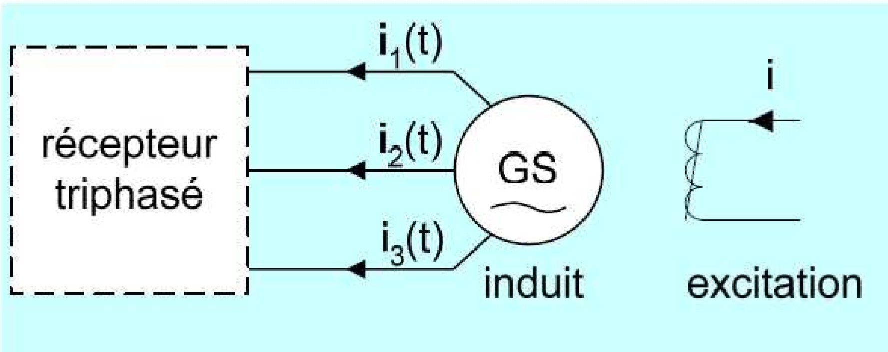


Fig. 4

Un système mécanique entraîne le rotor.
Il y a création d'un système de tensions triphasées dans les bobinages du stator.

3- Relation entre vitesse de rotation et fréquence des tensions triphasées

$$\boxed{f = pn}$$

avec :
f : fréquence (en Hz) En France, f = 50 Hz.
n : vitesse de rotation (en tr/s)
p : nombre de paires de pôles
• Autre relation
$\omega = 2\pi f = p\Omega$
avec :
ω : pulsation (en rad/s)
Ω : vitesse de rotation (en rad/s)

Tableau 1

p	n (tr/s)	n (tr/min)	Ω (rad/s)
1	50	3000	314
2	25	1500	157
3	16,7	1000	105
4	12,5	750	79
25	2	120	12,6
50	1	60	6,3

• Remarques
La production de l'énergie électrique se fait avec des alternateurs de grandes puissances (jusqu'à 1450 MW) :
- turboalternateurs de centrales thermiques (à pôles lisses : p = 2 ou 1)
- hydro alternateurs de barrages hydrauliques (à pôles saillants : p >> 1)
Ex. pour avoir f = 50 Hz :
- turboalternateur (p = 2) à 1500 tr/min
- hydro alternateur (p = 40) à 75 tr/min

4- Etude de l'alternateur

4-1- Fonctionnement à vide

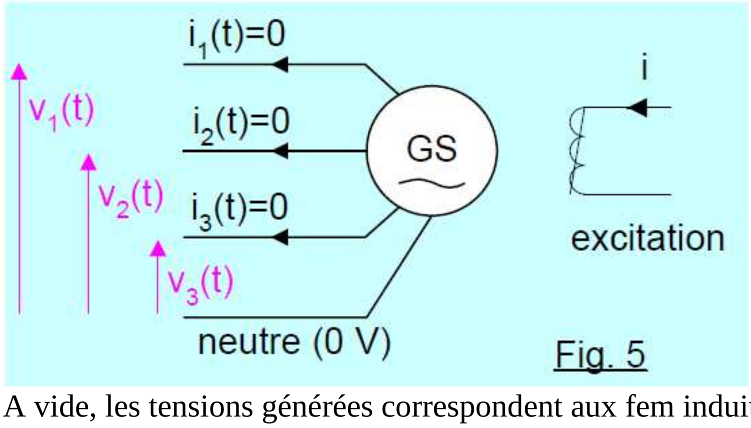


Fig. 5

A vide, les tensions générées correspondent aux fem induites dans les bobinages du stator par le champ tournant du rotor :
v i(t) = e i(t)
• Valeur efficace des fem induites

$$\boxed{E = k\Phi\Omega}$$

E : fem en volts
Φ : flux sous un pôle de l'inducteur
k : constante qui dépend de la machine

• Φ est proportionnel au courant inducteur i :

$$\boxed{\Phi \propto i}$$

4-2- Fonctionnement en charge

• Schéma électrique équivalent de Behn-Eschenburg
Hypothèse : circuit magnétique non saturé.
Au stator, le régime est sinusoïdal.
On utilise la notation complexe.
Pour la phase i :

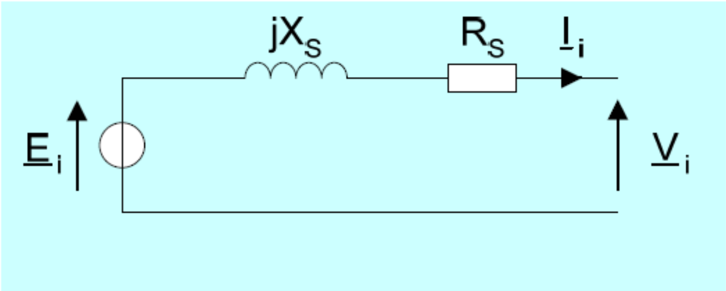


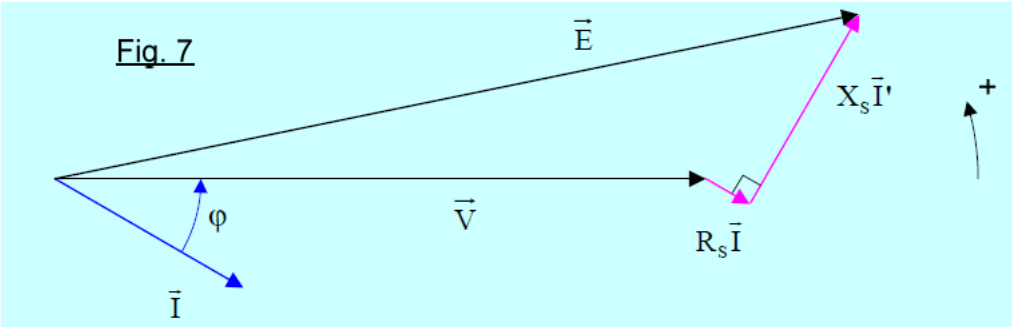
Fig. 6

Ei : fem induite
Ii : courant de ligne
Vi : tension entre phase et neutre
RS : résistance d'un enroulement statorique (couplage Y)
XS = LSω : réactance ***synchrone*** d'un enroulement statorique

• Loi des branches : $\underline{V}_i = \underline{E}_i - (R_S + jX_S)\underline{I}_i$

• Remarques
XS est proportionnelle à la vitesse de rotation.
En pratique XS >> RS

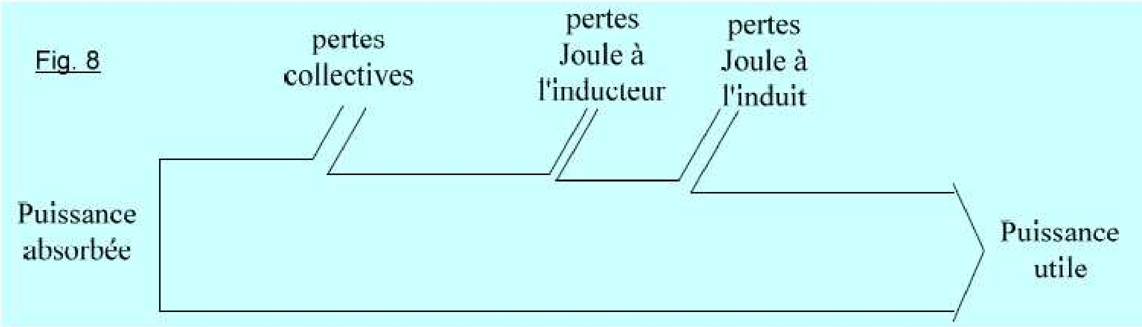
• Représentation vectorielle : diagramme de Behn-Eschenburg



$$\boxed{\vec{V}_i = \vec{E}_i - (R_S\vec{I}_i + X_S\vec{I}_i')}$$

• Chute de tension en charge : ΔV = E - V

5- Bilan de puissance de l'alternateur



• Puissance absorbée =

puissance mécanique reçue + puissance électrique consommée par l'inducteur

• Puissance utile = puissance électrique fournie à la charge triphasée

• pertes Joule

- dans l'induit : $3RSI^2$
- dans l'inducteur : ri^2 (r : résistance du bobinage de l'inducteur)

• Rendement

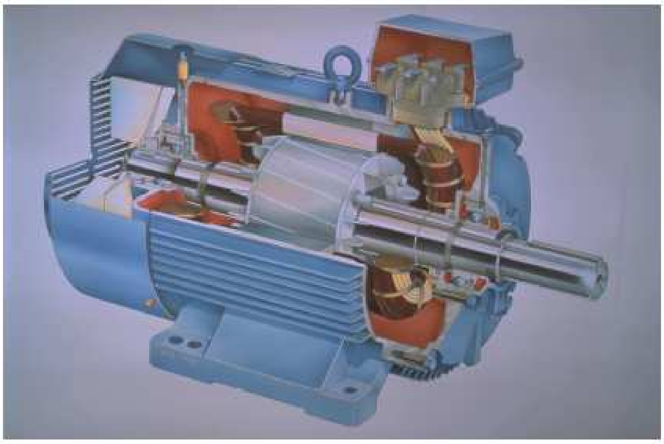
$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3}UI\cos\varphi}{\sqrt{3}UI\cos\varphi + \sum \text{pertes}}$$

Chapitre 7
Machine asynchrone triphasée

1- Introduction

• L'inducteur est situé au stator, l'induit au rotor.

• Le stator est identique à celui de la machine synchrone(bobinage triphasé qui crée un champ tournant).



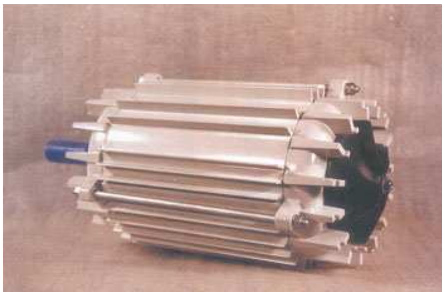


Fig. 1 moteur asynchrone à cage d'écureuil (coupe partielle)

• deux sortes de rotors :
- Rotor à “cage d'écureuil” (robuste et bon marché)
- Rotor bobiné

• trois types de fonctionnement :
- en moteur : utilisation la plus courante (machines outils ...)
- en génératrice : éolienne
- en frein : moteur frein

Dans la suite, on s’intéressera au moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil :

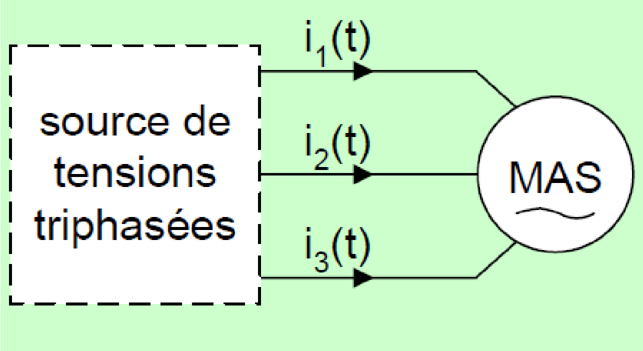


Fig. 2

2- Glissement

• La vitesse de synchronisme est la vitesse de rotation du champ tournant :

$$\boxed{n_S(tr/s) = \frac{f(Hz)}{p}} \qquad \boxed{\Omega_S(rad/s) = \frac{\omega}{p} = \frac{2\pi f}{p}}$$

• Le glissement mesure l'écart relatif entre la vitesse de rotation de la machine et la vitesse de synchronisme :

$$\boxed{g = \frac{n_S - n}{n_S} = \frac{\Omega_S - \Omega}{\Omega_S}}$$

$$\boxed{n = n_S(1 - g)}$$

• Exemple : Soit un réseau triphasé (f = 50 Hz) alimentant un moteur à trois paires de pôles (p = 3) :

n_S = 50/3 = 16,7 tr/s = **1000 tr/min**

A la charge nominale, ce moteur tourne à 950 tr/min :

g_N = (1000 - 950)/1000 = 0,05 = **5 %**

A vide (pas de charge), n ≈ 1000 tr/min :

g_{vide} ≈ **0 %**

Au démarrage (n = 0) :

g = 1 (100 %)

• Remarques

En fonctionnement normal, le glissement n'excède pas quelques pour cent.
A vide, un moteur asynchrone tourne pratiquement à la vitesse de synchronisme.

3- Plaque signalétique

Exemple :

3 ~	Y
400 V	50 Hz
3,3 A	1,5 kW
1430 tr/min	$\cos \varphi = 0{,}85$
17 kg	

U_N = 400 V : tension d'alimentation nominale entre phases
I_N = 3,3 A : courant de ligne consommé à charge nom.
Pu = 1,5 kW : puissance utile nom. (puissance mécanique fournie à la charge)
n_N = 1430 tr/min : vitesse de rotation nom.
$\cos \varphi_N$ = 0,85 : facteur de puissance nom.

4- Fonctionnement à vide

Les caractéristiques à vide ne figurent pas sur la plaque signalétique.
Pour le moteur précédent :
I_{vide} = 1,3 A
Pabsorbée = 190 W
n_{vide} = 1500 tr/min
d'où :

$$p = \frac{f}{n_S} = \frac{50}{1500/60} = 2 \qquad \text{(2 paires de pôles)}$$

$$\cos \varphi_{vide} = \frac{P_a}{\sqrt{3}UI} = \frac{190}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1{,}3} = 0{,}21 \quad \text{(fortement inductif)}$$

5- Fonctionnement en charge

	I (A)	cos φ	n (tr/min)	g (%)
A vide	1,3	0,21	1500	0
Charge nominale	3,3	0,85	1430	4,7

Commentaires :
- le courant consommé à vide est important
- la vitesse de rotation varie peu avec la charge

• Caractéristique mécanique Tu(n)

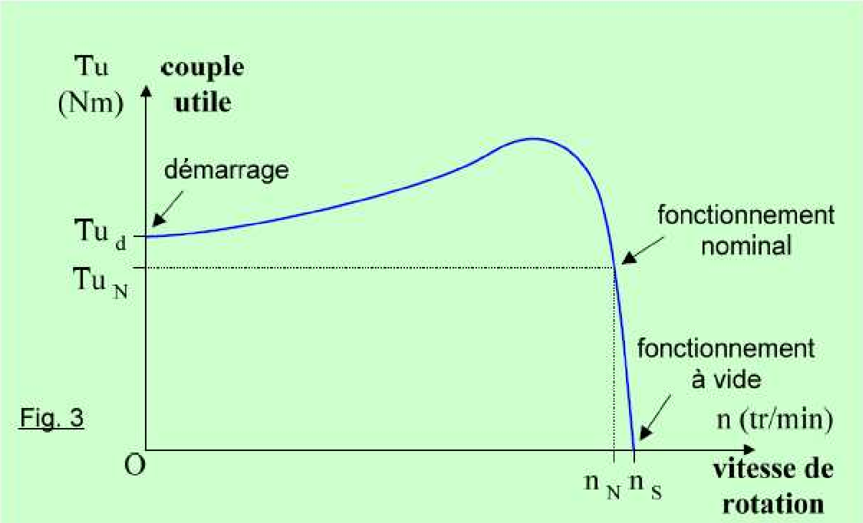


Fig. 3

Dans la zone utile, le couple utile est proportionnel au glissement :

$$\boxed{T_u \propto g}$$

A.N.
- couple utile nominal

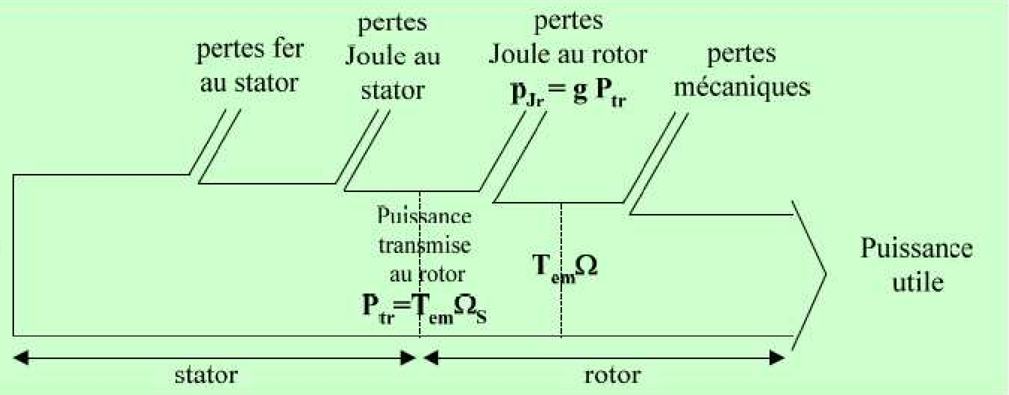
$$Tu_N = \frac{Pu_N}{\Omega_N} = \frac{1500}{1430 \cdot \frac{2\pi}{60}} = 10{,}0 \text{ Nm}$$

- couple utile à 1450 tr/min ?
glissement : (1500 - 1450)/1500 = 3,3 %

$$Tu = Tu_N \frac{g}{g_N} = 10{,}0 \cdot \frac{3{,}3}{4{,}7} = 7{,}1 \text{ Nm}$$

6- Bilan de puissance du moteur asynchrone

Fig. 4



• pertes Joule au rotor
pJr = Ptr - TemΩ = Tem (ΩS - Ω) = g Tem ΩS

$$\boxed{p_{Jr} = g\, P_{tr}}$$

• les pertes fer sont essentiellement localisées au stator (elles sont négligeables dans le rotor).

• Rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{\sqrt{3} UI \cos\varphi - \sum \text{pertes}}{\sqrt{3} UI \cos\varphi}$$

A.N.
- rendement nominal

$$\eta_N = \frac{Pu_N}{Pa_N} = \frac{1500}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 3{,}3 \cdot 0{,}85} = 77\ \%$$