

Machines à Courant Alternatif

I) Généralités :

Les machines à courant alternatif sont de nature réversible, c'est-à-dire elles peuvent fonctionner aussi bien en moteur qu'en générateur.

Elles sont classées essentiellement en deux types

- Les machines synchrones, généralement utilisées en générateur et sont appelées alors Alternateurs
- Les machines Asynchrones, généralement utilisées en moteur et sont appelées alors moteur Asynchrones.

II) Constitution :

Elles sont constituées essentiellement de deux parties : une partie fixe (le stator) et une partie tournante (le rotor)

- 1) **Le stator** : c'est un cylindre vide, fait d'un empilement de feuilles (feuilleté) identiques. L'intérieur du cylindre est encoché, dans ces encoches on loge un bobinage triphasé (ou monophasé).

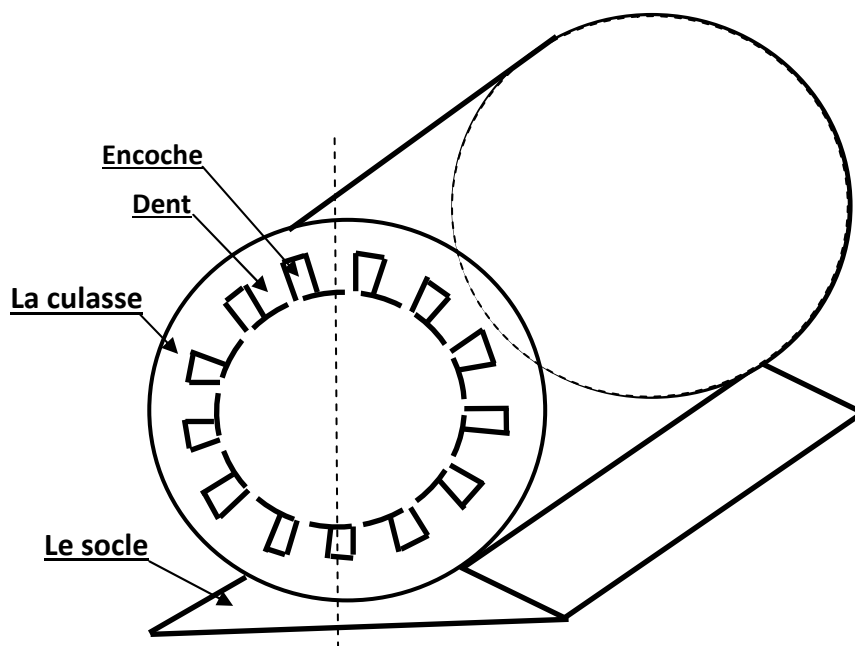


Figure 1 : Stator d'une machine à courant Alternatif

- 2) **Le Rotor** : dans les machines à courant Alternatif on trouve trois types de rotors qu'on verra en détail dans les chapitres suivants (Machines synchrones et machines asynchrones) :
 - Les rotors à pôles lisses
 - Les rotors à pôles saillants
 - Les rotors à cages d'écureuil.

III) Champ tournant

- 1) **Une spire + un aimant** : On fait tourner un aimant permanent à une vitesse ' n ' en tours/seconde. Le flux $\Phi(t)$ qui entre par la face droite de la spire est alternatif et la f.e.m induite $e(t) = -d\Phi(t)/dt$ sera alternative.

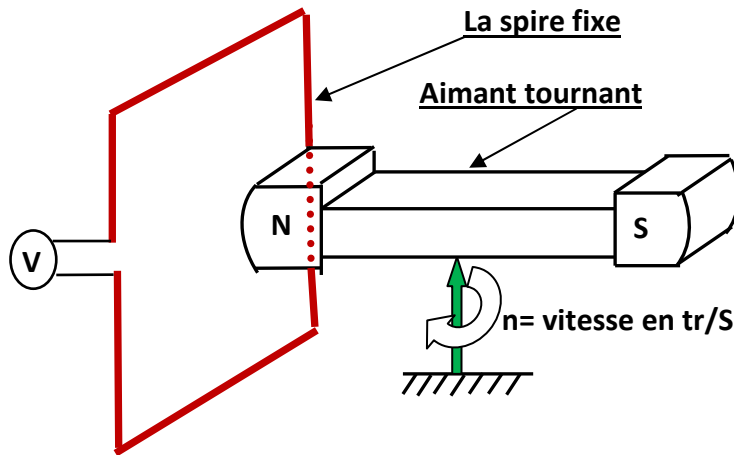


Figure : 2 Spire + aimant

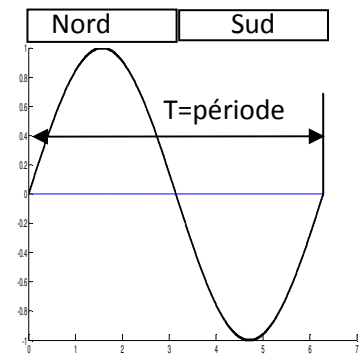


figure :3 f.e.m induite

La f.e.m induite sera $e(t) = E_{\max} \sin \omega t$ avec $\omega = 2\pi f$; f = fréquence
 n = vitesse en tours/seconde ; T = période = temps d'un tour = $1/n$; $f = 1/T = n$.
 On dit que le système (aimant tournant, spire fixe) est un générateur appelé Alternateur.

2) **Aimant permanent + aiguille aimantée**

Si on fait tourner l'aimant à une vitesse de rotation ' n ' l'aiguille aimantée va suivre la rotation à la même vitesse.

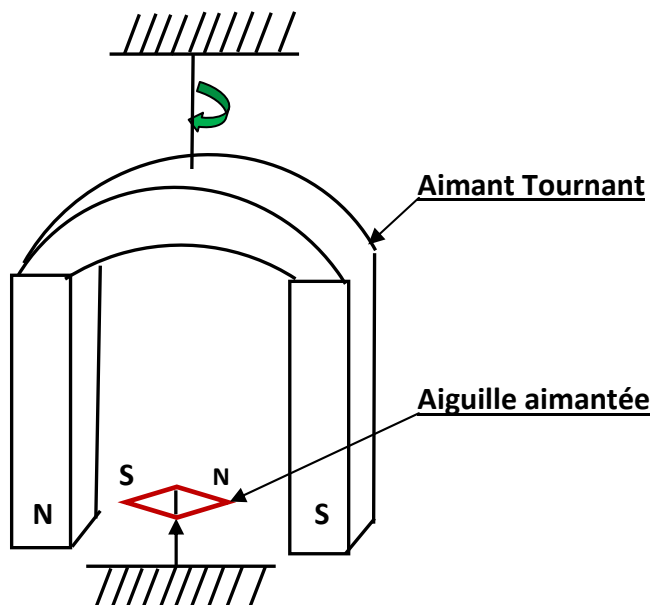


Figure 4 : Aimant + aiguille aimantée

3) Principe en triphasé

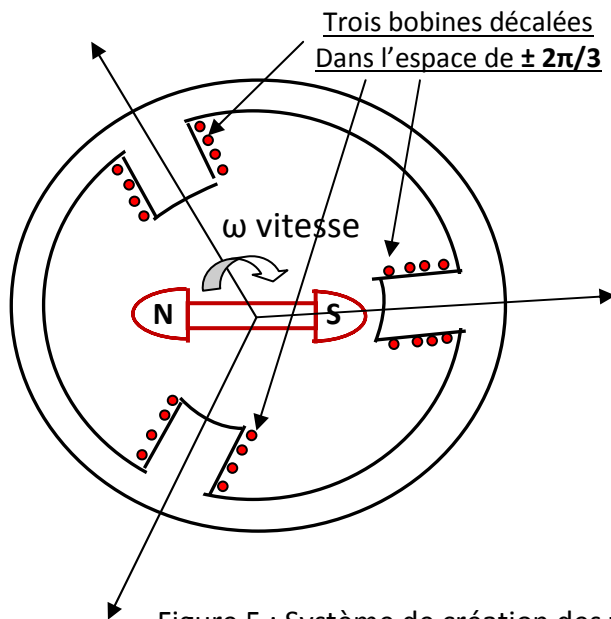


Figure 5 : Système de création des f.e.m triphasées

L'aimant permanent (N S) tourne à une vitesse angulaire ω en rd/S, à l'intérieur d'une partie fixe qui porte trois bobines identiques dont les axes font entre eux des angles de $\pm 2\pi/3$. Les f.e.m induites ($e_1(t)$, $e_2(t)$, $e_3(t)$) aux bornes des trois bobines seront décalées entre elles de $\pm 2\pi/3$. C'est le principe de fonctionnement des machines synchrones.

$$\begin{cases} e_1(t) = E_{\max} \sin \omega t \\ e_2(t) = E_{\max} \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ e_3(t) = E_{\max} \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{cases}$$

Inversement si on alimente les trois bobines par des courants triphasés de fréquence f , une aiguille aimantée (à la place de l'aimant) va tourner spontanément à la vitesse $n=f$.

Chapitre IV Machines synchrones

I) Généralités :

Les machines synchrones sont appelées ainsi parce que le rotor tourne à la vitesse du champ tournant statorique (appelée vitesse de synchronisme), elles peuvent fonctionner en moteur ou en générateur.

- 1) **Fonctionnement en générateur** : On fait tourner le rotor (électro-aimant) à la vitesse de synchronisme qui est déterminée par le nombre de pôles de la machine et la fréquence, puis on récupère les FEM induites dans les bobines du stator (induit). C'est le mode de fonctionnement le plus utilisé et dans ce cas elles sont appelées **Alternateurs**.
- 2) **Fonctionnement en moteur** : Dans ce cas on alimente le rotor et le stator. Ce mode de fonctionnement est assez rarement utilisé (uniquement pour les systèmes à vitesse constante). Elles sont aussi utilisées comme compensateur synchrone, pour relever le facteur de puissance de certaines installation (surexcitée capacitif, sous excitée inductif).

II) Constitution : Elles sont constituées essentiellement de deux parties : une partie fixe (le stator) et une partie tournante (le rotor)

- 1) **Le stator** : c'est l'induit, alésage cylindrique qui porte un enroulement triphasé ou monophasé $2p$ pôles

a) Stator monophasé

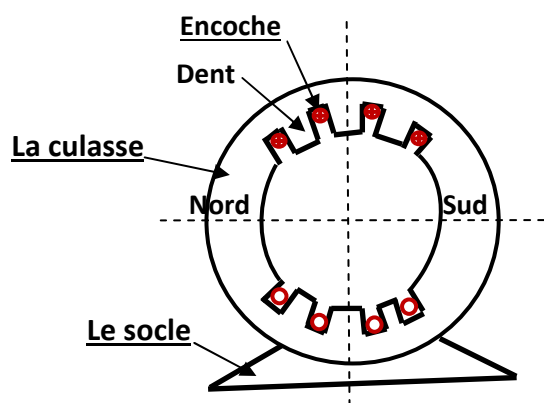


Figure : 6 Stator monophasé $2p=2$

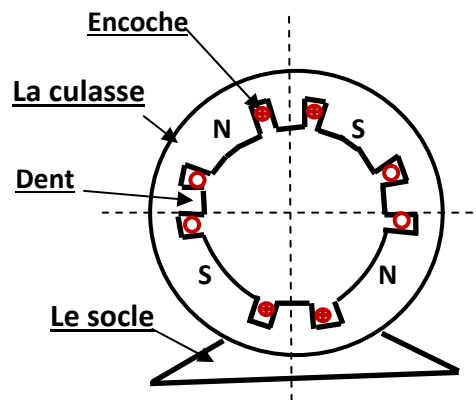


Figure :7 stator monophasé $2p=4$

b) Stator triphasé

Stator triphasé bipolaire : il est constitué de trois bobines identiques (AX, BY, CZ) dont les axes sont décalés de $\pm 2\pi/3$ électrique, figure 8.

Stator triphasé quadripolaire : il est constitué de six bobines identiques (AX, BY, CZ, A'X', B'Y', C'Z') dont les axes sont décalés de $\pm 2\pi/3$ électrique, figure 9.

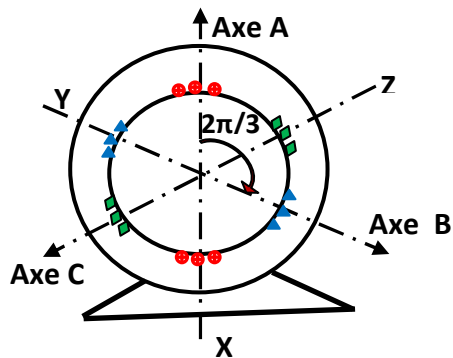


Figure 8 : Stator triphasé bipolaire $2p=2$

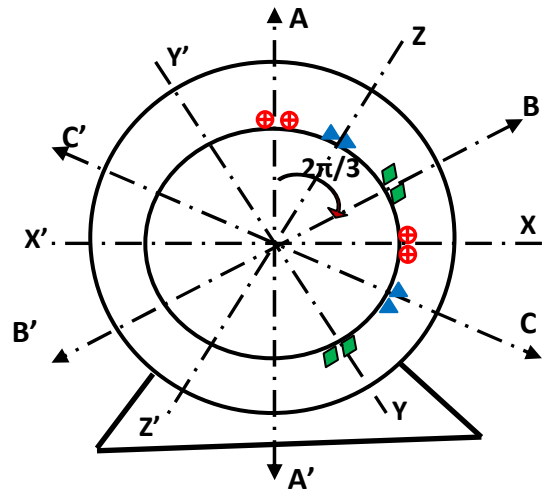


Figure 9 : Stator triphasé quadripolaire $2p=4$

2) Le rotor : c'est l'inducteur, il existe deux types de rotor, le rotor à pôles lisses et le rotor à pôles saillants (roue polaire).

-Le rotor des machines synchrones est alimenté avec du courant continu à l'aide d'un système (bagues, balais).

-Le rotor et le stator doivent avoir le même nombre de pôles ($2p$)

a) **Rotor à pôles saillants** : Sur les figure 10 et 11 est représenté respectivement un rotor à pôles saillants bipolaire et quadripolaire, pour $2p=6$ on aura 6 pôles etc....

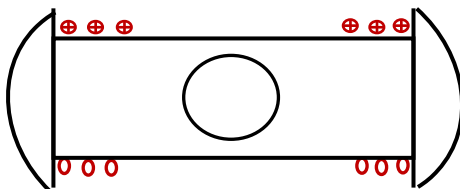


Figure 10 : rotor à pôles saillants $2p=2$

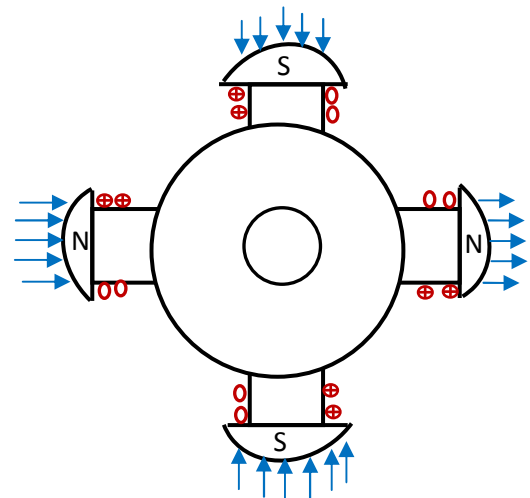


Figure 11 : Rotor à pôles saillants $2p=4$

a) **Rotor à pôles lisses**

Le rotor à pôles lisses est identique du point de vue construction à celui des MCC, c'est un cylindre encoché sur sa périphérie. Dans ces encoches on loge un enroulement qu'on alimente (à l'aide d'un système bagues-balais) avec du courant continu, de telle sorte qu'on obtient le même nombre de pôles $2p$ que le stator.

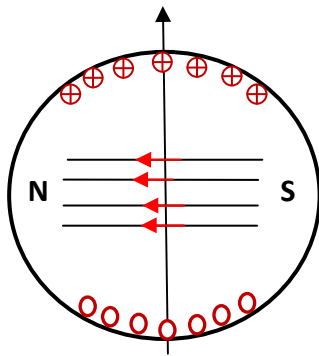


Figure 11 : rotor à pôles lisses $2p=2$

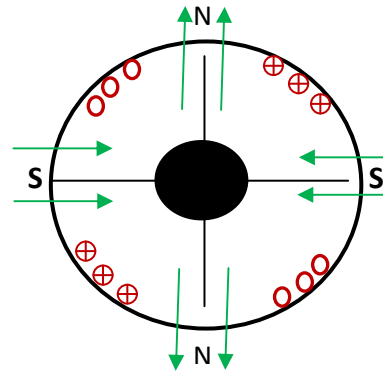


Figure 12 : Rotor à pôles lisses $2p=4$

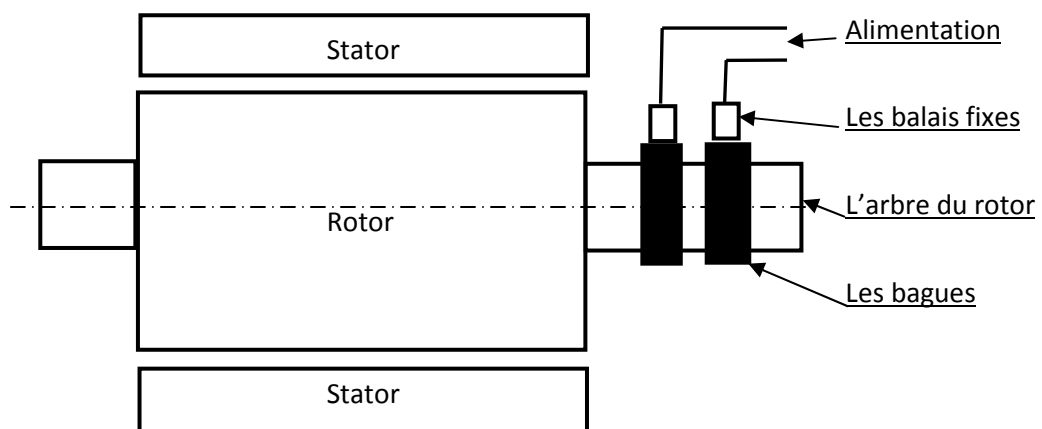


Figure 13 : Schéma d'une machine synchrone avec système d'alimentation (bagues+balais) du rotor

III)-Relation vitesse-fréquence

La fréquence (f) des courants induits dans les bobines du stator dépend de la vitesse du rotor et du nombre de pôles de la machine.

1) Machine bipolaire $2P=2$ donc $P=1$

On fait tourner le rotor à une vitesse $n_r=20$ tours/seconde.

En un point fixe du stator, pour un tour du rotor, on observe défilé le pôle nord et le pôle sud du rotor, donc un cycle=une période= T

Pour 20 tours /S on aura 20 cycles/seconde donc 20 T en une seconde.

$20 T = 1 S \Rightarrow T = 1/20 S$ et $f = 1/T = 20 \text{ Hz}$ (pour $p=1$ et $n_r=20$) $\Rightarrow f = 1 \cdot 20 = 20 \text{ Hz} = P \cdot n_r$

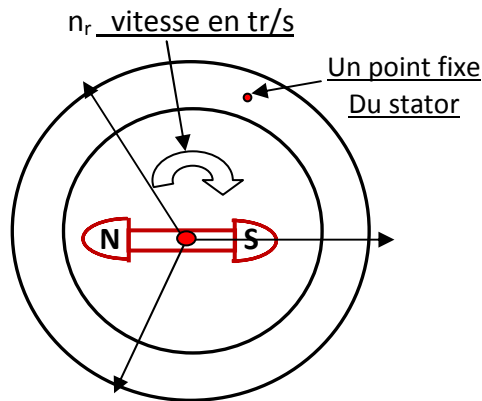


Figure 14 : Machine bipolaire

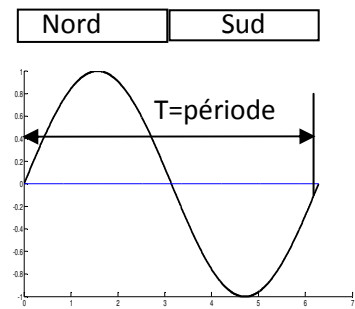


Figure 15 : Période de la tension induite

2) Machine quadripolaire 2p=4

On fait tourner le rotor à une vitesse $n_r=20$ tours/seconde. En un point fixe du stator, pour un tour du rotor, on observe défilé (le pôle nord, puis le pôle sud, puis le pôle nord et enfin le pôle sud) du rotor, donc deux cycle=deux période =2T

Pour 20 tours /S on aura 40 cycles/seconde donc 40 T en une seconde.

$40 T = 1 S \Rightarrow T = 1/40 S$ et $f = 1/T = 40 Hz$ (pour $p=2$ et $n_r=20$) $\Rightarrow f = 2 \cdot 20 = 40 Hz = P \cdot n_r$

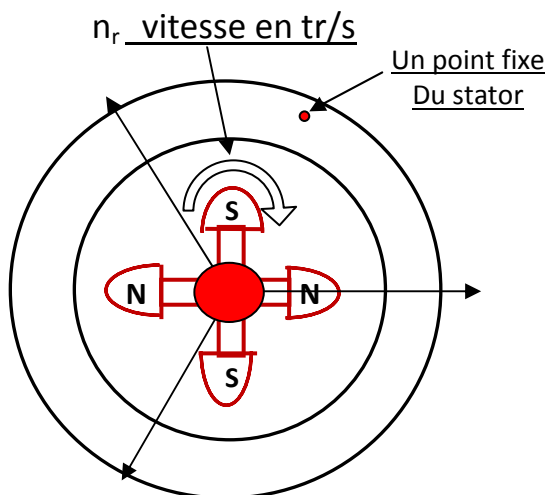


Figure 16 : Machine quadripolaire

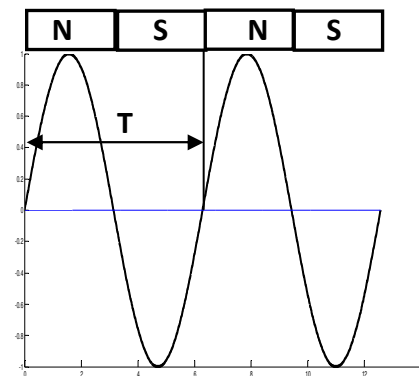


Figure 17 : Période de la tension induite

3) Machine hexa polaire 2P=6

On fait tourner le rotor à une vitesse $n_r=20$ tours/seconde.

En un point fixe du stator, pour un tour du rotor, on observe défilé (3 pôles nord et 3 pôles sud) du rotor, donc trois cycle=trois période =3T

Pour 20 tours /S on aura 60 cycles/seconde donc 60 T en une seconde.

$60 T = 1 S \Rightarrow T = 1/60 S$ et $f = 1/T = 60 Hz$ (pour $P=3$ et $n_r=20$) $\Rightarrow f = 3 \cdot 20 = 60 Hz = P \cdot n_r$

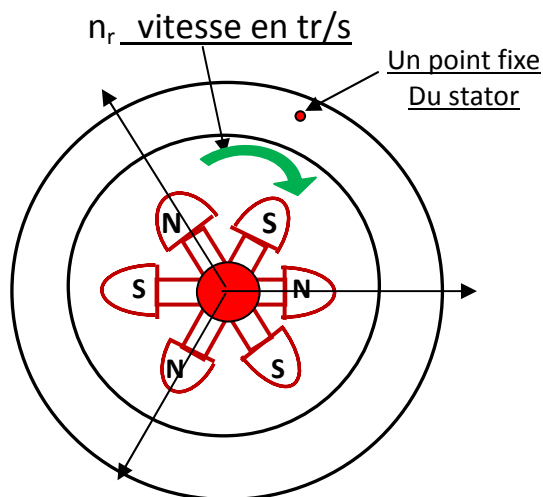


Figure 18 : Machine hexa-polaire

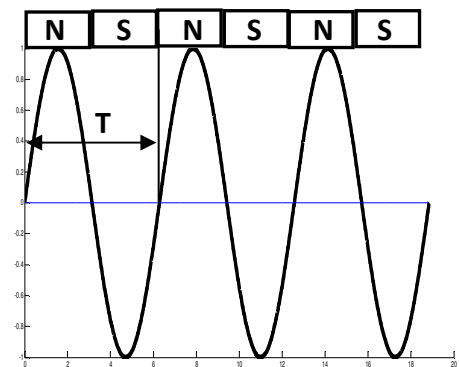


Figure 15 : Période de la tension induite

Donc on retient

$$f = P \cdot n_r$$

4) Vitesse de rotation des alternateurs :

Pour obtenir l'énergie électrique dans les centrales de production avec une fréquence $f = 50$ Hz, on doit faire tourner ces alternateurs (selon le nombre de pôles de la machine) aux vitesses suivantes : $n_r = f/P =$ vitesse en tr/s et $n_r = 60 \cdot f/P =$ vitesse en tr/minute,

Donc $n_r = 60 \cdot 50/P = 3000/P$

P = nombre de paire de pôles	1	2	3	4	5	6	8	10
n_r =vitesse en tours/minute	3000	1500	1000	750	600	500	375	300

IV) FMM et Induction dans l'entrefer créé par le rotor

Soit une bobine diamétrale du rotor contenant N_r spires, traversée par le courant d'excitation J

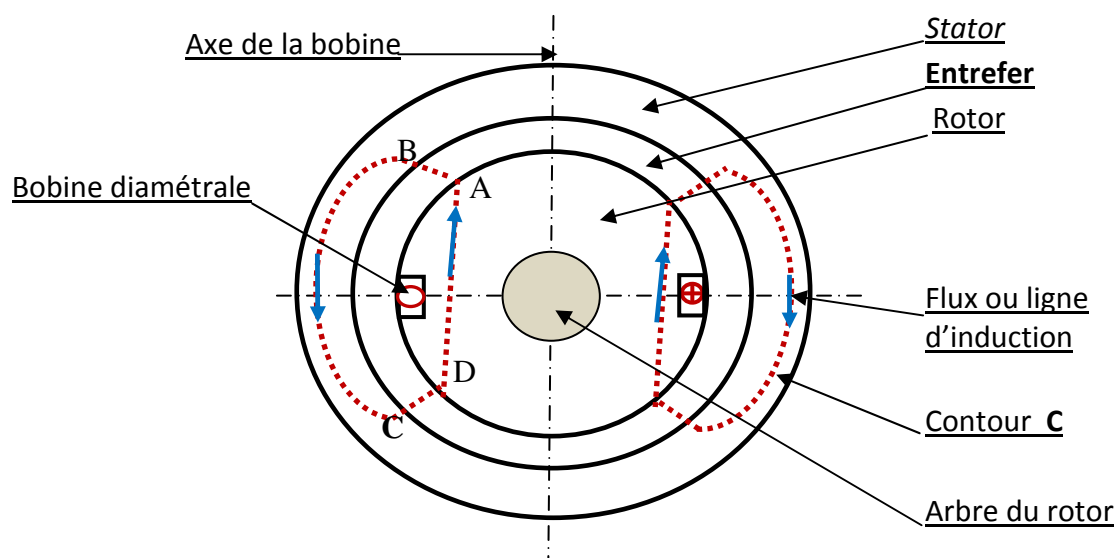


Figure : 16 FMM et contour d'intégration

D'après le théorème d'Ampère $N_r \cdot J = \int_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l}$ C= ABCDA= contour d'intégration fermé
 $AB=CD = \epsilon$ = épaisseur de l'entrefer, figure 16.

$$FMM = \mathcal{E} = N_r \cdot J = \sum H_{fer} \cdot l_{fer} + 2 \epsilon \cdot H_{air} \cong 2 \epsilon \cdot H_{air}$$

La perméabilité relative du fer ferromagnétique est très supérieure à celle de l'air ($\mu_r \gg 1$), donc toute la FMM sera concentrée dans l'entrefer.

$$\Rightarrow H = \frac{N_r J}{2 \epsilon} \Rightarrow B = \mu_0 H = \mu_0 \frac{N_r J}{2 \epsilon} \quad \text{non saturé car l'air ne se sature pas}$$

La moitié de la FMM $N_r \cdot J / 2$ pour la traversée du rotor vers le stator et la deuxième moitié pour la traversée du stator vers le rotor.

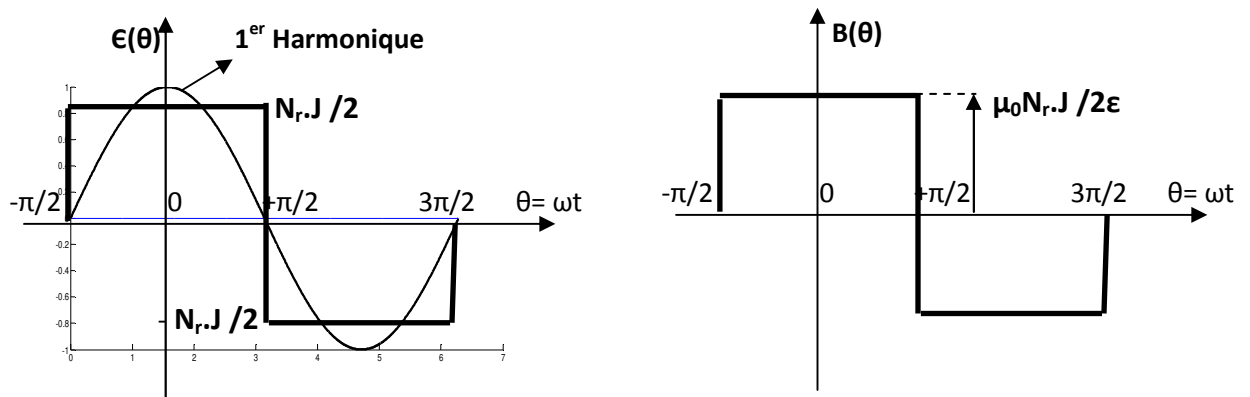


Figure 17 : Allure de la FMM $\mathcal{E}(\theta)$ et de l'induction dans l'entrefer $B(\theta)$

Toute fonction périodique $f(t)$ peut être décomposée en séries de Fourier. Vu la double symétrie par rapport à la demi et au quart de période, la valeur moyenne, les termes en sinus ainsi que les termes paires en cosinus seront nulles. Ils ne restent que les termes impairs en cosinus

$f(t) = B_1 \cos \omega t + B_3 \cos 3\omega t + \dots$ Et si on se limite au 1^{er} harmonique on trouve :

$$B_{max} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_r J}{2 \epsilon} = \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{N_r J}{\epsilon}$$

$$\mathcal{E}(\theta) = \mathcal{E}_{max} \cos \omega t \quad \text{pour la FMM} \quad \text{et} \quad B(\theta) = B_{max} \cos \omega t \quad \text{pour l'induction}$$

$$\mathcal{E}_{max} = \frac{4}{\pi} \frac{N_r J}{2} = 2 \frac{N_r J}{\pi} \quad \text{et} \quad B_{max} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{N_r J}{2 \epsilon} = \frac{2}{\pi} \mu_0 \frac{N_r J}{\epsilon}$$

Pour trois bobines réparties dans trois encoches on aura :

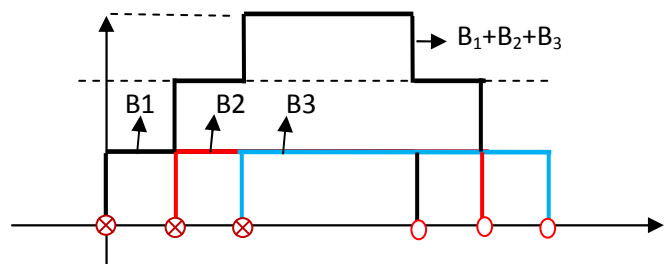


Figure 18 : Induction résultante de trois bobines réparties

V) FEM d'une phase du stator

- 1) **Définition** : Le flux utile par pôle d'une machine à courant alternatif est défini comme suite : $\Phi_u = B_{moy} \cdot S$ avec B_{moy} = la valeur moyenne de l'induction sous un pôle

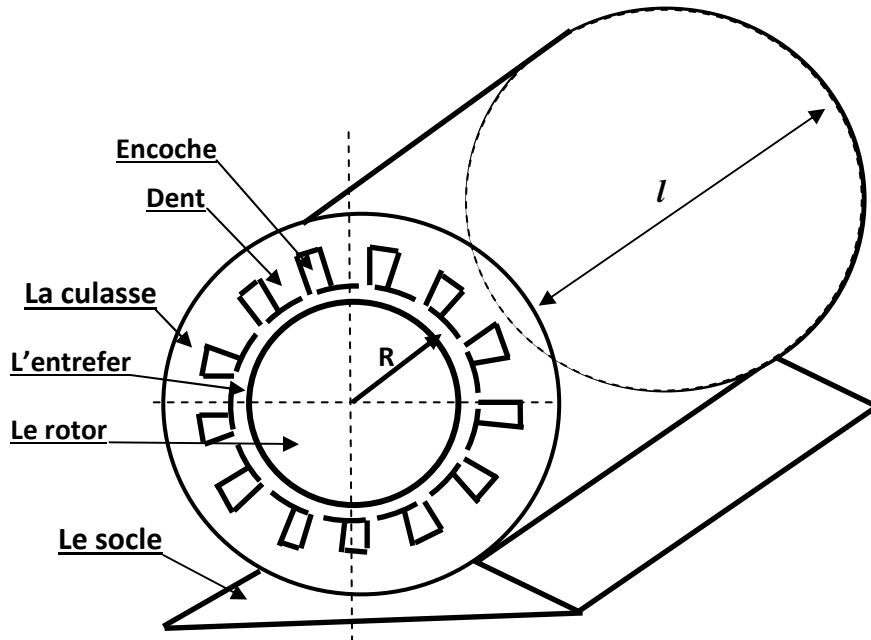


Figure 16 : Géométrie de la machine

S = surface sous un pôle = surface intérieur du stator / nombre de pôles = $2 \pi R l / 2P$

R = rayon intérieur du stator ou extérieur du rotor, l = longueur de la machine

Pour tout signal sinusoïdal, la valeur moyenne est égale à deux sa valeur maximal

divisé par π . On suppose que l'induction est sinusoïdale donc $B_{moy} = 2 B_{max} / \pi$

$$\Phi_u = B_{moy} \cdot S = (2 B_{max} / \pi) \cdot (2 \pi R l / 2P) = 2 R l B_{max} / P$$

- 2) **FEM d'un brin** on a vue que $e = B \cdot l \cdot v$ et $f = P \cdot n_r$

Ω = vitesse angulaire en rd/S

V = vitesse linéaire en m/S

n_r = vitesse du rotor en tours/S

R = rayon intérieur du stator
ou extérieur du rotor

$$\Rightarrow V = R \Omega = R \cdot 2\pi n_r$$

L'induction est supposée sinusoïdale $B(t) = B_{max} \cos \omega t$

$$e(t) = v \cdot l \cdot B(t) = R \cdot 2\pi n_r \cdot l \cdot B(t) = R \cdot 2\pi n_r \cdot l \cdot B_{max} \cos \omega t = (R \cdot 2\pi \cdot P \cdot n_r \cdot l \cdot B_{max} / P) \cdot \cos \omega t$$

$$= (R \cdot 2\pi \cdot P \cdot n_r \cdot l \cdot B_{max} / P) \cos \omega t = \Phi_u \cdot \pi \cdot P \cdot n_r \cos \omega t = \Phi_u \cdot \pi \cdot f \cos \omega t$$

Pour N_s brins par phase du stator, la fem d'une phase sera :

$$e_T(t) = N_s \cdot e(t) = N_s \cdot \Phi_u \cdot \pi \cdot f \cos \omega t = E_{max} \cos \omega t \text{ avec}$$

$$E_{max} = \pi \cdot N_s \cdot f \cdot \Phi_u \text{ et } E_{eff} = E = E_{max} / \sqrt{2} = (\pi / \sqrt{2}) \cdot N_s \cdot f \cdot \Phi_u = 2.22 N_s \cdot f \cdot \Phi_u$$

$$E = 2.22 \cdot N_s \cdot f \cdot \Phi_u$$

C'est la FEM induite dans une bobine diamétrale
et qui se trouve dans une seule encoche

- 3) **Coefficient de Kapp** : En réalité l'enroulement est généralement constitué de plusieurs bobines, distribuées dans plusieurs encoches et la FEM devient

$$E = K \cdot N_s \cdot f \cdot \Phi_u \quad \text{Avec } K = 2.22 \cdot K_f \cdot K_b = \text{coefficient de Kapp}$$

K_f = coefficient de forme

$K_b = K_d \cdot K_i \cdot K_r$ = coefficient de bobinage

K_i = coefficient d'inclinaison ;

K_r = coefficient de raccourcissement

K_d = coefficient de distribution

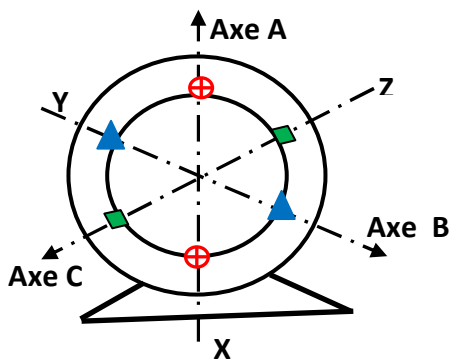


Figure 17 : Bobine diamétrale dans une seule encoche

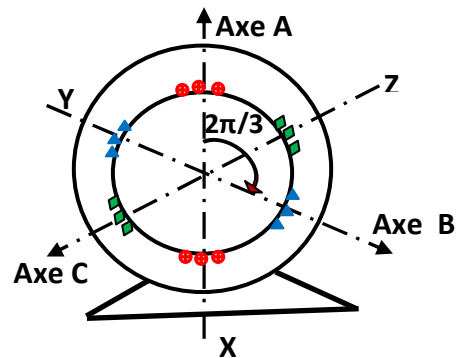


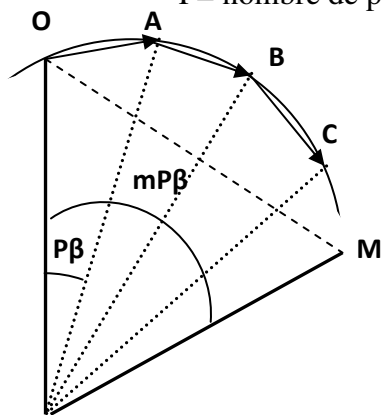
Figure 18 : Bobine diamétrale dans trois encoches

Coefficient de bobinage : Si le bobinage est distribué dans plusieurs encoches, le coefficient de bobinage se calcule comme suit :

$$K_b = \frac{\sin \frac{mP\beta}{2}}{m \sin \frac{P\beta}{2}} \quad m = \text{nombre d'encoches/pole/phase ;}$$

$P\beta$ = décalage électrique entre deux encoches consécutives;

P = nombre de paires de pôles.



Pour m encoches/pole/phase ; figure 19

$OA = AB = BC = \dots$

$K_b = OM / (OA + AB + BC + \dots) = OM / m \cdot OA$

Figure 19 : Coefficient de bobinage

VI) Bilan de puissances et rendement

1) Pertes constantes :

- Les pertes mécaniques : elles sont dues aux frottements mécaniques sur l'arbre et à la ventilation. Elles ne dépendent que de la vitesse et comme la vitesse est constante $n_r = n_s$ elles sont constantes : $P_{mec} = cte$.
- Les pertes fer : ce sont les pertes par hystérésis et par courants de Foucault, elles ne dépendent de la fréquence et de l'induction maximale dans l'entrefer (qui ne varie pas beaucoup) donc elles sont constantes : $P_{fer} = cte$.
- Les pertes par excitation : c'est la puissance dépensée dans l'inducteur (circuit rotorique alimenté par du courant continu). Elles ne dépendent pas de la charge, donc elles seront constantes : $P_{ex} = U \cdot J = R_{ex} \cdot J^2 = cte$.

$$P_{fer} + P_{mec} + P_{ex} = \alpha = cte$$

- 2) **Les pertes variables** : Ce sont les pertes par effet Joules dans l'induit (stator), qui est généralement triphasé (étoile ou triangle) :

$$P_j = 3 R I^2 = (3/2) \cdot r \cdot I^2 = \beta I^2$$

r = résistance mesurée entre phases
 R = résistance d'une phase
 I = courant de ligne (induit)

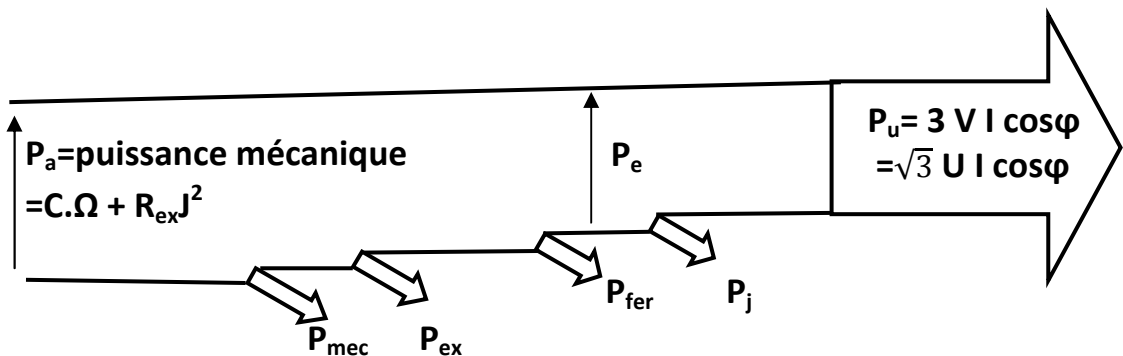


Figure. 19 : Bilan de puissances d'un Alternateur

3) Rendement d'un alternateur

$$\eta = \frac{\text{puissance utile}}{\text{puissance absorbée}} = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_u + \text{Pertes}} = \frac{P_u}{P_u + P_{mec} + P_{ex} + P_{fer} + P_j}$$

$$= \frac{P_u}{P_u + \alpha + \beta I^2} = \frac{3 V I \cos \phi}{3 V I \cos \phi + \alpha + \beta I^2}$$

4) Rendement maximal

$$\frac{\partial \eta}{\partial I} = 0 \Rightarrow 3V \cos \phi (\alpha - \beta I^2) = 0 \Rightarrow \alpha = \beta I^2$$

Le rendement est maximal quand **pertes constantes = pertes variables**

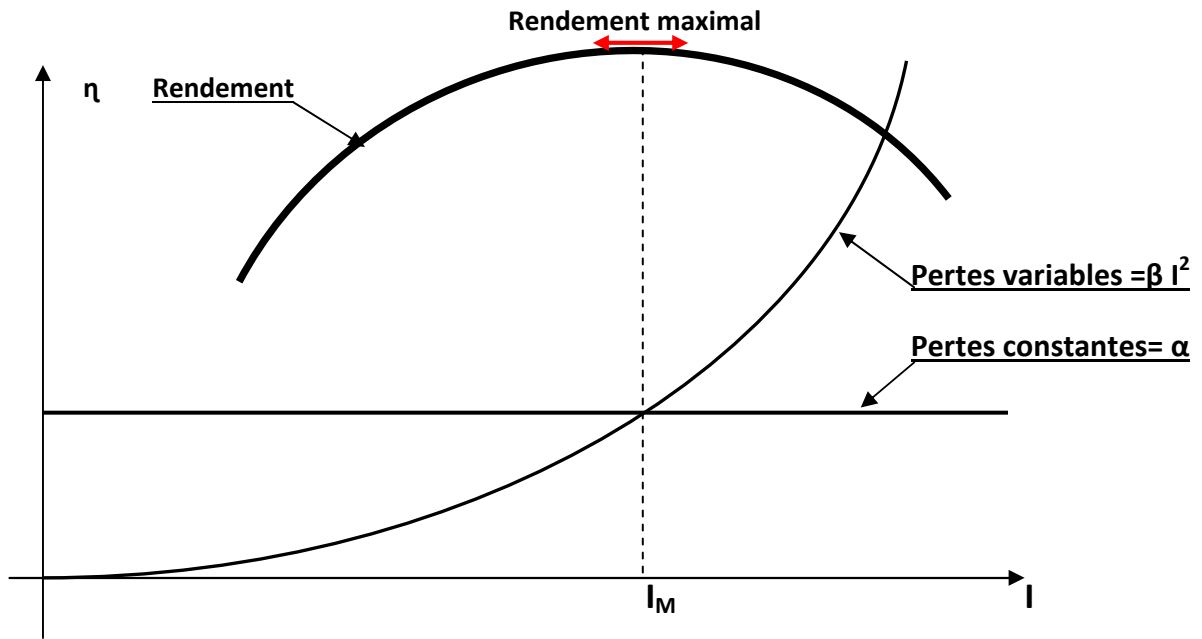


Figure. 20 : Rendement d'un Alternateur

VII) Caractéristiques des alternateurs

- 1) **Caractéristique à vide** : On fait tourner le rotor à la vitesse de synchronisme $n_r = n_s$, on excite le rotor, on fait varier le courant d'excitation J et on relève la tension induite E_j aux bornes de l'induit en fonction de ce courant $E_j = f(J)$

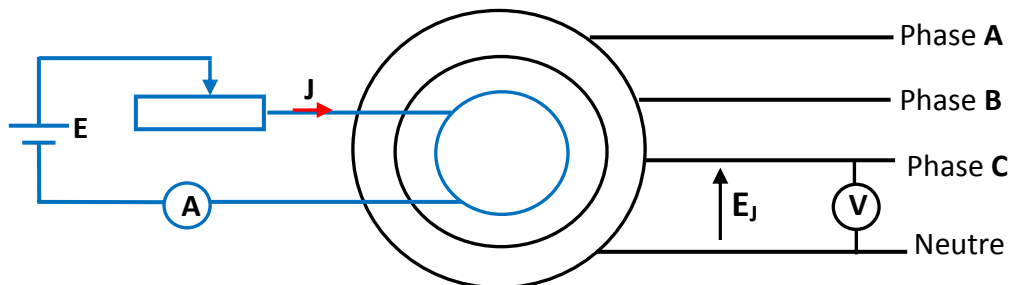


Figure. 21 : Schéma de montage pour relever la caractéristique à vide

à vide le courant d'induit I est nul, on relève la tension entre phase et neutre $E_j = E_v = f(J)$. La zone 1 est la zone non saturée, elle est linéaire, la zone 2 c'est le coude et la zone 3 c'est la zone de saturation. Dans la zone non saturée la FEM induite E_j est proportionnelle au courant d'excitation $E_j = k \cdot J$

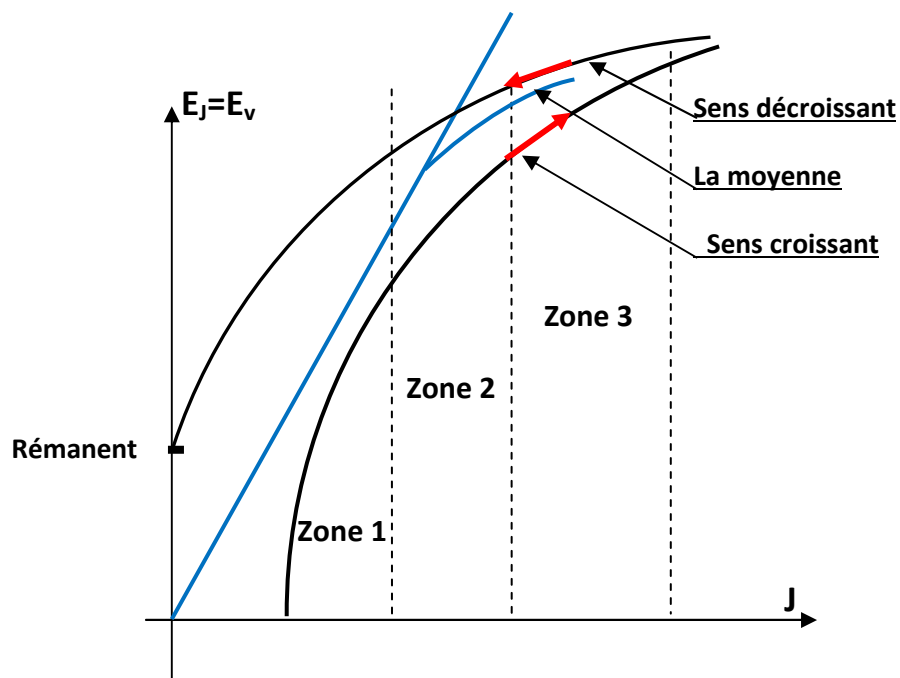


Figure. 22: Caractéristique à vide d'un alternateur

- 2) **Caractéristique en charge** : On fait tourner le rotor à la vitesse de synchronisme $n_r = n_s$, on excite le rotor jusqu'à sa valeur nominale $J = J_n = \text{cte}$, on charge l'alternateur avec une charge triphasé équilibrée variable et on relève à $\cos \varphi = \text{cte}$ la tension V entre phase et neutre en fonction du courant d'induit.

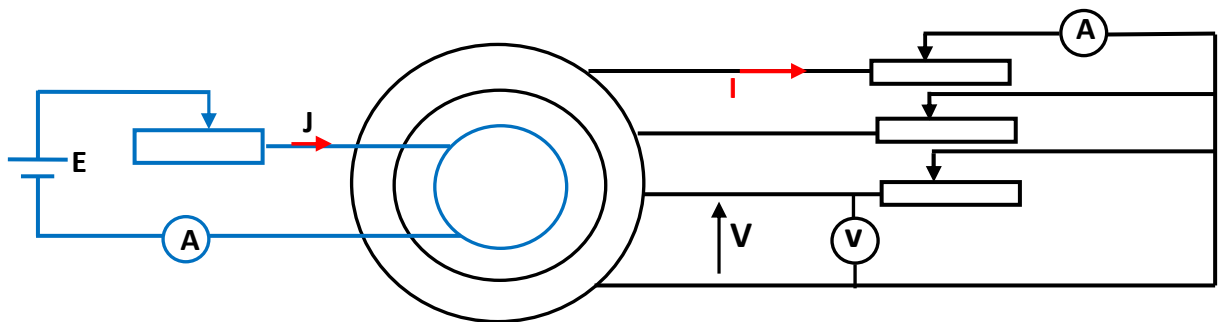


Figure. 23 : Schéma de montage pour relever la caractéristique en charge

On remarque qu'il y a une chute de tension $\Delta V = E_v - V$ qui croît avec le courant d'induit. Cette chute de tension est due essentiellement à la résistance de l'induit (RI) aux fuites magnétiques ($L\omega I$) et à la réaction magnétique de l'induit qui est fonction de I et de $\cos \varphi$.

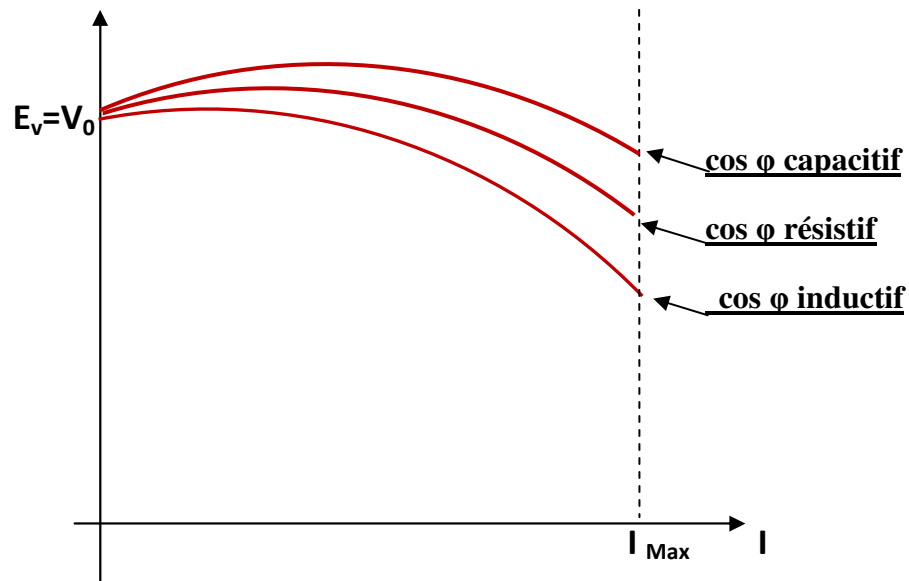


Figure. 22: Caractéristique en charge d'un alternateur

VIII) Diagrammes vectoriels de fonctionnement

Pour décrire le fonctionnement des alternateurs il n'est pas obligatoire de réaliser les essais au laboratoire, les diagrammes vectoriels de fonctionnement permettent de prévoir de manière analytique ou graphique les variations d'une grandeur en fonction des autres grandeurs, par exemples $V = f(E_J, I, \cos \varphi)$ ou $E_J = f(V, I, \cos \varphi)$.

Il existe quatre sortes de diagrammes principaux qui diffèrent entre eux par leur précision :

- 1) **Diagramme à réactance synchrone : (Behn-Eschenburg)** Il est utilisé pour les machines à pôles lisses, ce diagramme ne tient pas compte de la saturation.
- 2) **Diagramme de Potier** : Il est utilisé pour les machines à pôles lisses, ce diagramme tient compte de la saturation.
- 3) **Diagramme à deux réactances** : Il est utilisé pour les machines à pôles saillants, ce diagramme ne tient pas compte de la saturation.
- 4) **Diagramme de Blondel** : Il est utilisé pour les machines à pôles lisses, ce diagramme tient compte de la saturation.

IX) Diagramme à réactance synchrone

Dans ce diagramme on néglige la saturation $\Rightarrow E_J = K J$ et $E_I = K \alpha I$

$E_J =$ La f.e.m créé par le courant inducteur J

$E_I =$ La f.e.m créé par le courant d'induit I

Pour simplifier le schéma on représente la machine synchrone suite : chaque phase du stator présente une résistance interne R et une réactance de fuite $l\omega$, figure :23 .

- 1) **Réaction d'induit** : Les brins actifs de l'induit (stator) sont traversés par le courant d'induit I et ils se trouvent dans un champ magnétique variable (créé par le rotor), vont créer une f.e.m antagoniste (nuisible) qu'on appelle f.e.m de réaction d'induit $\underline{E_I} = -jK \alpha \underline{I}$

En réalité la machine fonctionne sous la f.e.m résultante \underline{E}_r :

$$\underline{E}_r = \underline{E}_j + \underline{E}_I = R \underline{I} + j l \omega \underline{I} + \underline{V}$$

$$\begin{aligned} \underline{E}_j &= \underline{E}_r - \underline{E}_I = R \underline{I} + j l \omega \underline{I} + \underline{V} - \underline{E}_I = R \underline{I} + j l \omega \underline{I} + \underline{V} + j K \alpha \underline{I} \\ &= R \underline{I} + j (l \omega + K \alpha) \underline{I} + \underline{V} = R \underline{I} + j X \underline{I} + \underline{V} \end{aligned}$$

Avec $X = l \omega + K \alpha$ = Réactance synchrone, elle rend compte de tout le flux qui traverse l'induit

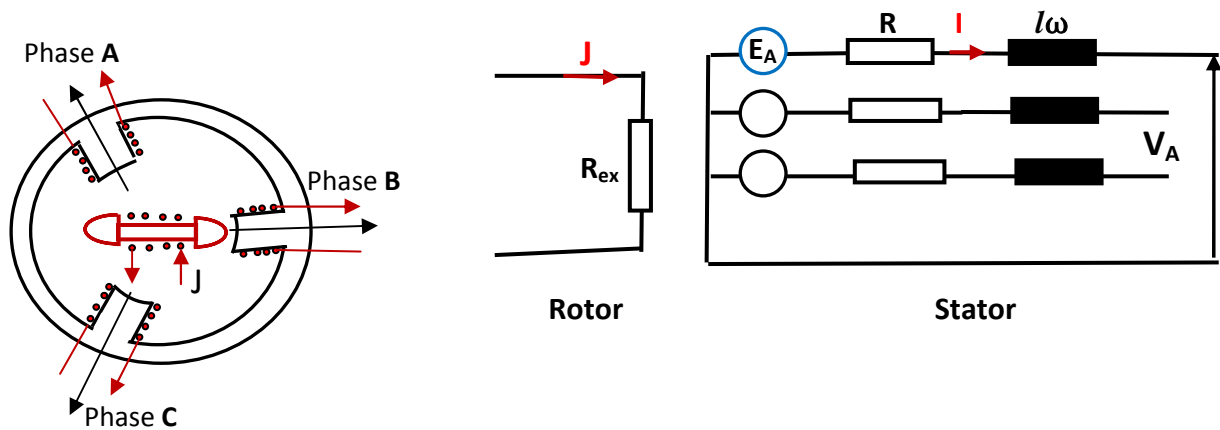


Figure. 23: Schéma et circuit équivalent d'un alternateur

L'alternateur est assimilé à une source de f.e.m \underline{E}_j ayant une impédance interne $\underline{Z} = R + jX$. Comme on est en triphasé équilibré on ne représente qu'une seule phase.

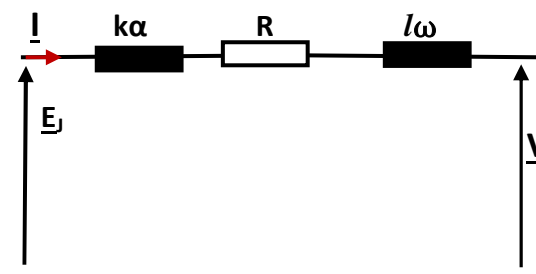


Figure. 24: Circuit équivalent d'un alternateur avec sa réactance synchrone

D'où le diagramme vectoriel suivant :

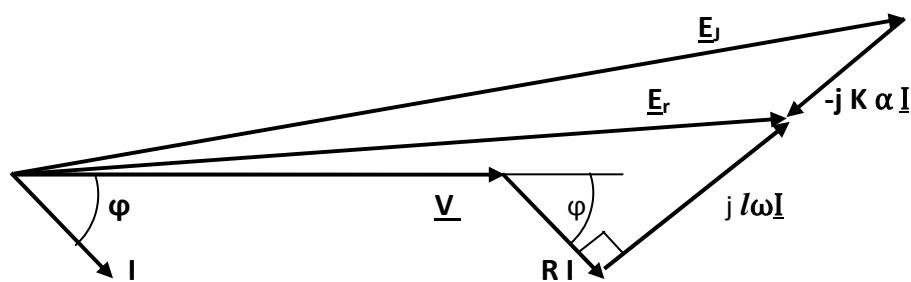


Figure. 25: diagramme vectoriel d'un alternateur avec sa réaction d'induit

Ce diagramme permet à partir du régime aux bornes ($V \mid \varphi$) de passer à la f.e.m E_J que doit créer le flux inducteur

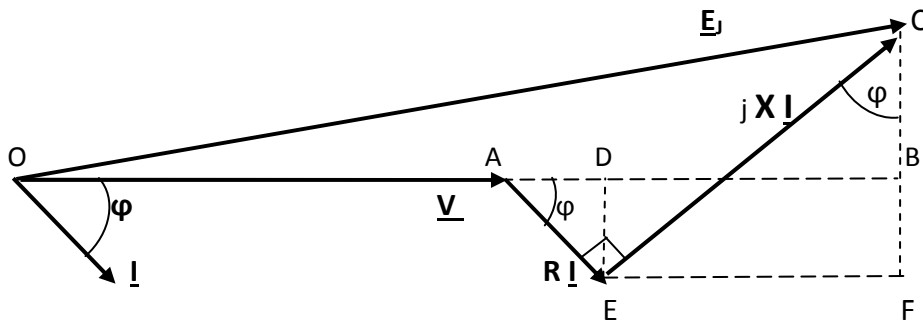


Figure. 25: diagramme vectoriel d'un alternateur avec sa réactance synchrone

$$E_J^2 = OC^2 = OB^2 + BC^2$$

$$OA = V \quad ; \quad AD = R I \cos \varphi \quad ; \quad DB = EF = X I \sin \varphi$$

$$OB = OA + AD + DB = V + R I \cos \varphi + X I \sin \varphi$$

$$BC = FC - FD = X I \cos \varphi - R I \sin \varphi$$

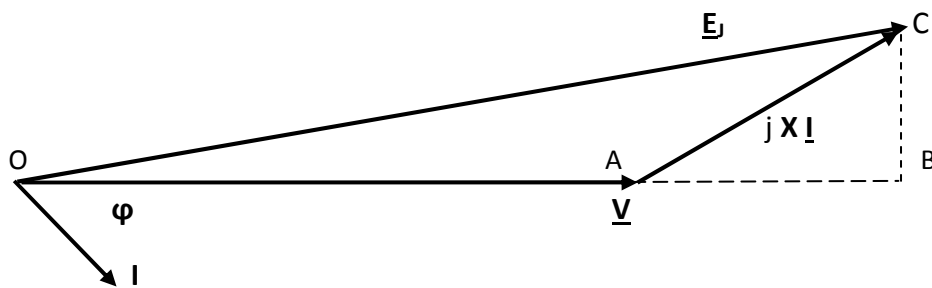
$$E_J^2 = OC^2 = OB^2 + BC^2$$

$$E_J^2 = (V + R I \cos \varphi + X I \sin \varphi)^2 + (X I \cos \varphi - R I \sin \varphi)^2$$

et
$$V = \sqrt{E_J^2 - I^2 (X \cos \varphi - R \sin \varphi)^2} - I (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

2) Diagramme de Behn-Eschenburg simplifié

Dans ce diagramme on néglige $R I$ devant $X I$ et V



$$E_J^2 = (V + X I \sin \varphi)^2 + (X I \cos \varphi)^2$$

et
$$V = \sqrt{E_J^2 - I^2 (X \cos \varphi)^2} - X I \sin \varphi$$

3) Détermination des éléments du diagramme de Behn-Eschenburg

- a) **Résistance d'une phase = R**: La mesure doit se faire à chaud c'est-à-dire après un certain temps de fonctionnement, on peut procéder à l'aide d'un Ohmmètre et mesurer la résistance (r) entre deux phases du stator
 $r_{\text{mesurée}} = 2 R$ si le branchement est en étoile
 $r_{\text{mesurée}} = 3 R/2$ si le branchement est en triangle
- b) **Essai à vide** on reprend la caractéristique à vide (figure 22) en supposant que la machine n'est pas saturée, donc $E_J = f(J)$ sera une droite. $E_J = K J$
- c) **Essai en court-circuit** : - On fait tourner le rotor jusqu'à la vitesse synchrone ;

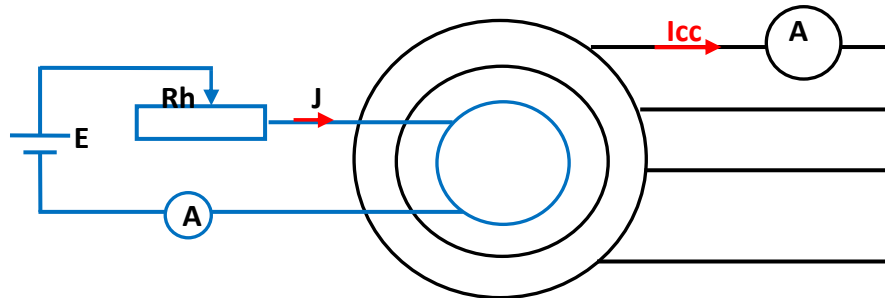


Figure. 25: Schéma de montage de l'essai en court-circuit

-On court-circuite les trois phases du stator à travers un ampèremètre, figure : 25.
 -On excite le rotor et on augmente doucement le courant d'excitation J (à l'aide du rhéostat Rh) jusqu'à avoir $I_{cc} = I_n$ = courant nominale de la machine et on trace la caractéristique en court-circuit $I_{cc} = f(J) = K_{cc} J$ qui est une droite (un seul point suffit) car la machine n'est pas saturée.

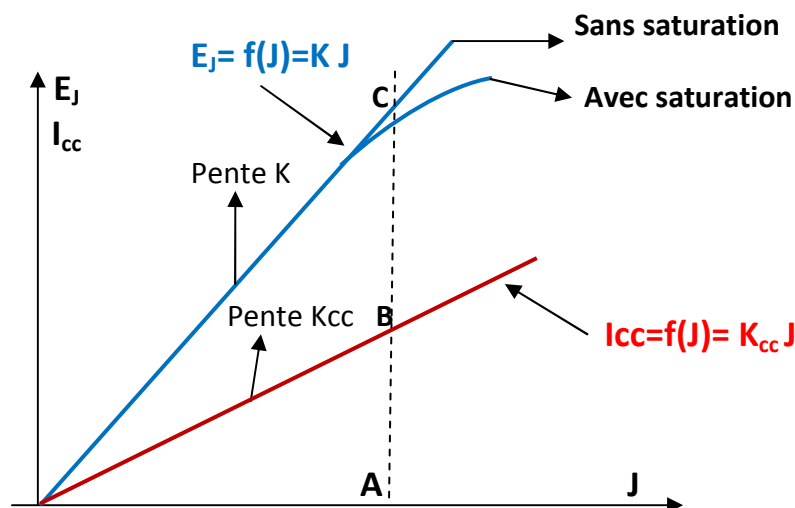


Figure. 25: Caractéristique à vide et en court-circuit

$$\underline{E}_J = \underline{R} \underline{I} + j \underline{X} \underline{I} + \underline{V} \quad \text{en court-circuit } \underline{V}=0 \Rightarrow \underline{E}_J = \underline{R} \underline{I}_{cc} + j \underline{X} \underline{I}_{cc} \Rightarrow \underline{E}_J = \underline{Z} \underline{I}_{cc}$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{E}_J}{\underline{I}_{cc}} = \frac{AC}{AB} = \frac{K}{K_{cc}} = \sqrt{R^2 + X^2} \Rightarrow X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

X) Diagramme de Potier

Ce diagramme est utilisé pour les machines à pôles lisses (réaction d'induit transversale et longitudinale identiques) et il tient compte de la saturation c'est-à-dire \underline{E}_J n'est pas supposé proportionnel à \underline{J} .

Potier désigne par λ la réactance de fuite $\underline{I}\omega = \lambda$

On trace $\underline{E}_r = \underline{R} \underline{I} + j \lambda \underline{I} + \underline{V}$

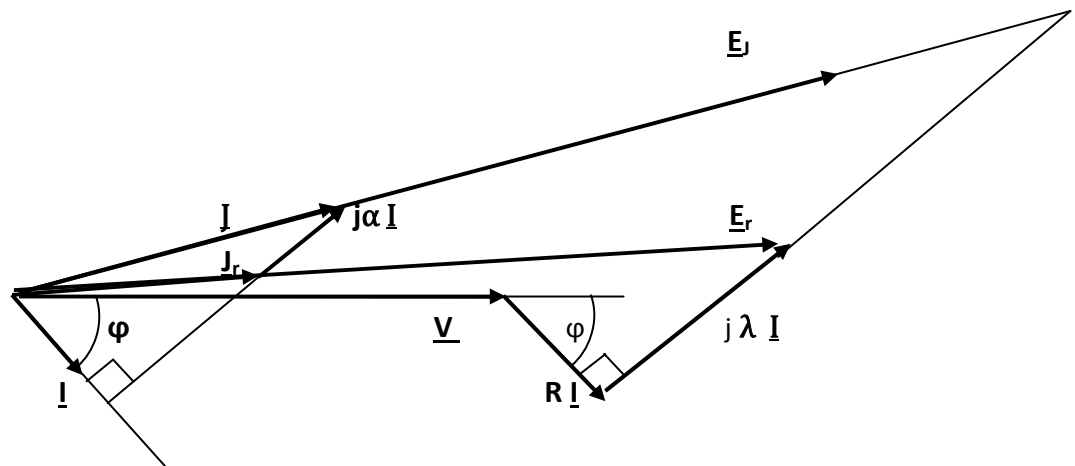


Figure. 26: Diagramme de Potier

Le but du diagramme est d'arriver à \underline{J} c'est-à-dire le courant d'excitation que doit créer le flux et compenser la réaction d'induit. Ce diagramme permet de passer d'un point de fonctionnement $(\underline{V}, \underline{I}, \cos\varphi)$ au courant \underline{J} qu'il faut donner.

1) Détermination des paramètres (λ et α) du diagramme de Potier

- Mesure de la résistance R d'une phase du stator ;
- L'essai à vide nous donne $\underline{E}_J = f(\underline{J})$ en tenant compte de la saturation ;
- L'essai en déwatté (charge purement inductive $\varphi = \pi/2$) nous donne $\underline{V}_{dw} = f(\underline{J}_{dw})$ ou bien 1 point $(\underline{V}_{dw}, \underline{J}_{dw}, \underline{I}_{dw})$ après le coude de saturation.
- L'essai en court-circuit (1 point suffit car en CC la machine n'est pas saturée donc linéaire) ce point doit être pour $\underline{I}_{cc} = \underline{I}_{dw}$ ce qui nous donne le point $(\underline{J}_{cc1}, 0 \text{ V})$ sur l'axe \underline{OJ} .

On trace sur le même graphe la caractéristique à vide et en court-circuit, on place le point $M = (\underline{V}_{dw}, \underline{J}_{dw})$ ce point M nous donne \underline{I}_{dw} , ce \underline{I}_{dw} nous donne $\underline{I}_{cc} = \underline{I}_{dw}$, ce \underline{I}_{cc} nous donne grâce à \underline{J}_{cc1} , le point M' (Figure : 27), on mesure OM' et on place O' tel que $OM' = O'M$, à partir de O' on mène $O'X'$ parallèle à OX (partie linéaire). $O'X'$ coupe la partie non linéaire en T , on abaisse de T la perpendiculaire à $O'M$, cette perpendiculaire coupe $O'M$ en S , on mesure ST et SM et on fait la conversion (selon les échelles)

$$SM = \alpha \underline{I}_{dw} \text{ en } [A] \quad \text{et} \quad ST = \lambda \underline{I}_{dw} \text{ en } [V]$$

Détermination de J :

Connaissant $(R, \alpha, \lambda, I, V, \cos\phi)$ on trace $\underline{E}_r = R \underline{I} + j \lambda \underline{I} + \underline{V}$

On lit sur la caractéristique réelle $E = f(J)$ le courant J_r correspondant à E_r , on porte J_r sur E_r et on trace $j\alpha \underline{I}$ perpendiculaire à \underline{I} (figure 26) puis $\underline{J} = \underline{J}_r + j\alpha \underline{I}$

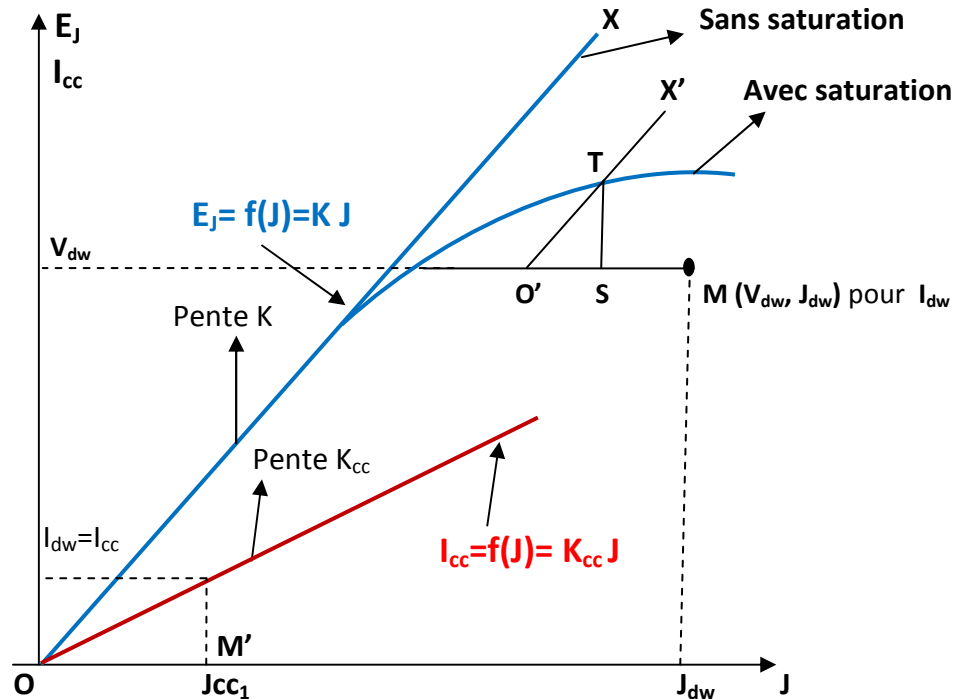


Figure. 27: Courbes permettant de déterminer α et λ

XI) Diagramme à deux réactances synchrones

Ce diagramme est utilisé pour les machines à pôles saillants donc les réactions d'induit transversale et longitudinale ne sont pas identiques, il ne tient pas compte de la saturation. Donc on aura X_t et X_l avec $E_j = k_1 J$ et $E_l = k_2 I$

1) Essai de glissement permet de déterminer X_t et X_l

XII) Diagramme de Blondel

Ce diagramme est utilisé pour les machines à pôles saillants donc les réactions d'induit transversale et longitudinale ne sont pas identiques, il tient compte de la saturation