

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sousse**

---

Département Génie Electrique  
Spécialité : Electronique

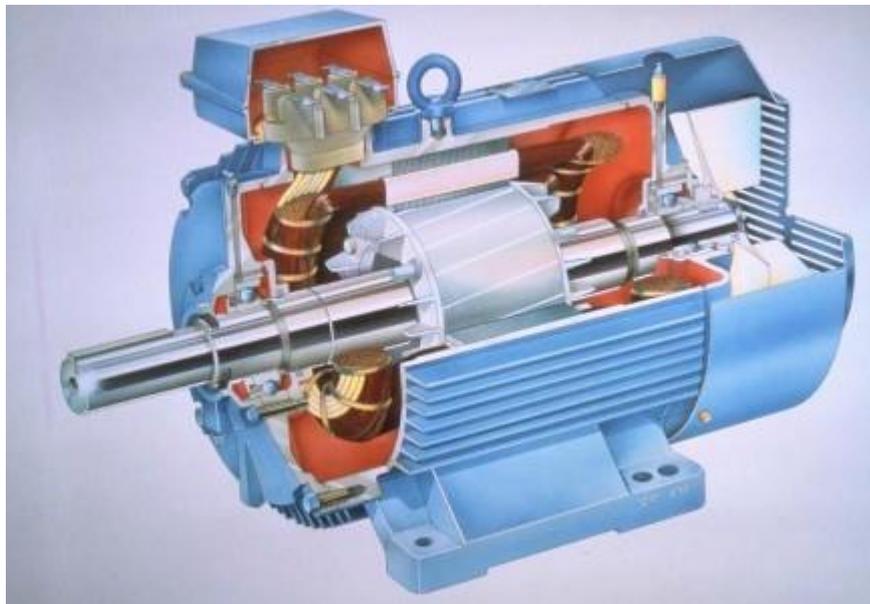
Support de cours destiné aux techniciens

Des ISETs

Niveau 2

Electrotechnique

Réalisé par : GRIRI Faouzi.



Année Universitaire 2003/2004

# Sommaire

## Chapitre =°I Notion d 'électromagnétisme

I- Vecteur Induction magnétique .....	5
I-1 Couple s'exerçant sur une aiguille aimantée	
I-2 Unité d'induction magnétique	
II- Influence d'un champ magnétique .....	5
II-1 Force électromagnétique ou force de Laplace	
II-2 Exemple	
III- Induction magnétique due à des courants électriques .....	6
III-1 Induction magnétique créée par un courant	
a) Formule de biot et savart	
Exemple 1 : Induction magnétique créée par un courant rectiligne (infini)	
Exemple 2: Induction magnétique créée par un courant circulaire en un point M de son axe	
b) théorème d'ampère:	
Exemple 1 : Courant rectiligne	
Exemple 2 : tore électromagnétique	
IV- Induction électromagnétique .....	9
VI-1 Force électromotrice induite	
Exemple	
IV-2 Sens de la f.é.m induite	
V- Induction mutuelle.....	10
V-1 Induction mutuelle : phénomène d'induction mutuelle.	
V-2 Inductance d'une bobine sans faire :(dans l'air)	
V-3 Inductance d'une bobine avec noyau magnétique :	
VI- Théorie du circuit magnétique .....	11
VI-1 Propriétés	
VI-2 Caractéristiques des circuits magnétiques	
Chapitre =°II bobine à noyau de fer	
I- description .....	12
II- Symbole.....	12
III- Généralité .....	12

IV- Bobine à noyau de fer .....	13
IV-1 Diagramme de fonctionnement	
IV.3 Comportement temporel des différentes grandeurs	
IV.4 Les pertes dans les bobines à noyau de fer	
IV.4.1 Pertes par courants de Foucault	
IV.4.2 Pertes par hystérésis	
IV.4.3. Globalisation des pertes : pertes fer	
IV.5 Technologie et applications des bobines à noyau de fer	
IV.5.1 Eléments de technologie de réalisation	
IV.5.2 Applications	
Chapitre =°III Les Transformateurs monophasés	
I- constitution .....	18
a/ circuit magnétique :	
b/ Les enroulements :	
I- Notations utilisées.....	18
II- Symbolisations .....	19
III- Fonctionnement du transformateur à vide	
III.1. Mise en place	
III.2. Mise en équation	
III-3 Diagramme de fonctionnement	
IV- Fonctionnement du transformateur en charge.....	22
IV.1 Mise en place	
IV.2. Mise en équation	
IV-3 Etablissement du schéma équivalent	
IV-4 Bilan des puissances	
V- Comportement simplifié dans l'hypothèse de Kapp.....	23
V-1 Etablissement du schéma équivalent simplifié ramenée au secondaire	
V-2 Détermination de la chute de tension	
VI- Rendement du transformateur .....	25
VII- Etude expérimental du transformateur .....	25
VII-1 Essai à vide sous tension nominale	
VII-1-1 Détermination de m	
VII-1-2 Détermination des pertes fer matérialisées par la résistance $R_f$	

VII-2 Essai en court-circuit à courant secondaire nominal sous tension primaire réduite

VII-2-1 Détermination de la résistance  $R_s$  et de la réactance  $X_s$  ramenées au secondaire

VIII- Exploitation des résultats expérimentaux .....28

Chapitre =°IV Les transformateurs triphasés

I- Description des transformateurs triphasés .....28

- a) Ensemble de trois transformateurs monophasés identiques
- b) Transformateur triphasé :

II. Fonctionnement en régime équilibré .....30

2.1 Fonctionnement à vide

2.2 Fonctionnement en charge :

- a) Résistances des enroulements et fuites magnétiques négligées
- b) Résistances et fuites magnétiques prises en compte

2.3 Couplages du primaire et du secondaire :

- a) Couplage étoile
- b) Couplage triangle
- c) Conséquences
- d) Valeurs nominales

2.4. Etude expérimentale et prédétermination du fonctionnement en charge

- 1) L'essai à vide
- 2) L'essai en court –circuit

Chapitre V Machines à courant continu

I- Présentation générale.....39

I.1 Conversion d'énergie

I.2 Symbole

I.3 Constitution

I.4 Force électromotrice

I.5 Couple électromagnétique

I.6 Puissance électromagnétique

I.7 Réversibilité

I.8 Caractéristiques

I.8.1 Caractéristique à vide  $E_v = f(\Phi)$  □ à  $\Phi$  constante

I.8.2 Caractéristique  $E_v = f(\Omega)$  à  $\Phi$  constant

I.8.3 Phénomène d'hystérésis

I.8.4 Caractéristique en charge  $U = f(I)$

1.8.5 Modèle équivalent de l'induit

Chapitre VI Moteur à courant continu sous tension constante

I – Caractéristiques du moteur en excitation séparée .....45

    I.1- Montage expérimental

    I.2- caractéristiques de vitesse

        a) Fonctionnement à vide

        b) Fonctionnement en charge

        c) Sens de rotation

    I.3- Caractéristiques du couple :  $T_u = f(I)$

    I.4- Caractéristique mécanique :  $T_u = f(n)$

    I.5 Point de fonctionnement

    I.6 Bilan énergétique

    I.7 Couples

    I.8 Rendement

        I.8.1 Mesure directe

        I.8.2 Méthode des pertes séparées

II- Caractéristiques du moteur en excitation série .....47

    II.1- Caractéristique de vitesse :  $n = f(I)$

        a) Sens de rotation

        b) Nécessité d'un rhéostat de démarrage

    II.3- caractéristique mécanique :  $T_u = f(n)$

        a) Fonctionnement à vide

        b) Fonctionnement en charge

    II.4 Bilan énergétique

II- Moteur universel .....55

III- Emploi et identification.....55

    IV.1 Moteur à excitation indépendante

    IV.2 Moteur à excitation en série

    IV.3 Remarque

EXERCICES.....56

## Notion d 'électromagnétisme

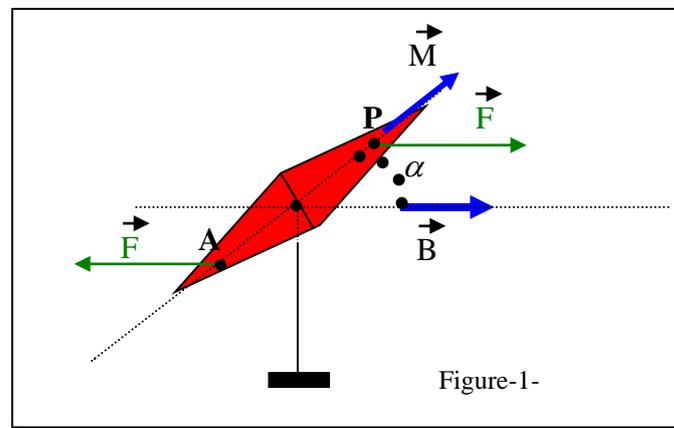
### I- Vecteur Induction magnétique :

#### I-1 Couple s'exerçant sur une aiguille aimantée :

C'est un fait expérimental : une aiguille aimantée placée dans un champ magnétique uniforme (par exemple dans le champ magnétique terrestre) est soumise à un couple (comme le dipôle électrique dans un champ électrique uniforme) :(figure :1)

Par analogie avec le dipôle électrique nous exprimerons ce couple par :

$$\Gamma = M.B.\sin\alpha$$



- M : désigne le moment magnétique de l'aimant
- B : le vecteur induction magnétique
- $\alpha$  : angle formé par la direction de l'aiguille aimantée avec la direction du vecteur B
- Les points d'application A et P des deux forces magnétiques sont inconnus, mais le moment magnétique M (couple maximal dans un champ magnétique uniforme d'induction unité ) est parfaitement mesurable. On convient de le représenter par un vecteur dirigé suivant l'axe de l'aiguille et dans le sens est tel qu'il tend à se coucher sur le vecteur B

#### I-2 Unité d'induction magnétique :

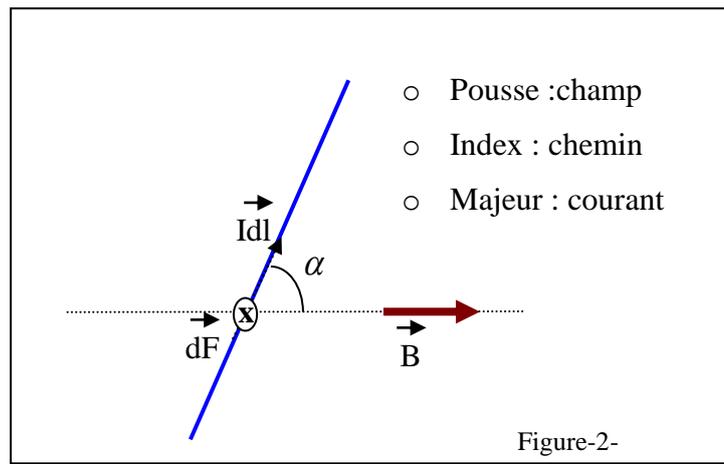
Le vecteur B s'appel vecteur induction magnétique. Son module s'exprime en Teslas.

## II- Influence d'un champ magnétique :

### II-1 Force électromagnétique ou force de Laplace :

Quand un élément de courant  $Idl$  est placé en un point d'un champ où l'induction est  $B$ , il est soumis à une force  $dF$  : (Figure :2)

- Dont la direction est perpendiculaire au plan défini par  $B$  et  $Idl$
- Dont le sens (lorsque  $\alpha = \frac{\pi}{2}$ ) est donné par la règle des trois doigts de la main droite
- Dont le module est :  $dF = Idl.B.\sin \alpha$



### II-2 Exemple : Couple exercé sur une bobine placée dans un champ d'induction uniforme B

Une bobine de  $n$  spires (surface moyenne  $s$ ) parcourue par un courant  $I$  placée dans un champ uniforme d'induction  $B$  est soumise à un couple dont le moment magnétique  $M = n.s.I$

$$\rightarrow \Gamma = n.s.I.B.\sin \alpha$$

## III- Induction magnétique due à des courants électriques :

Vecteur  $B$  et vecteur  $H$

- Le vecteur  $B$  caractérise la déformation du milieu au point considéré, son flux est conservatif.
- Le vecteur  $H$  caractérise la contrainte du milieu (dont la déformation est la conséquence), son flux n'est pas conservatif.

La relation entre ces deux vecteurs est  $B = \mu_0 \mu_r . H = \mu . H$

$\mu_r$  : perméabilité relative du milieu magnétique.

$\mu_0$  : perméabilité du vide est égale à  $4.\pi.10^{-7}$

$\mu = \mu_r \mu_0$  : perméabilité absolu de ce milieu.

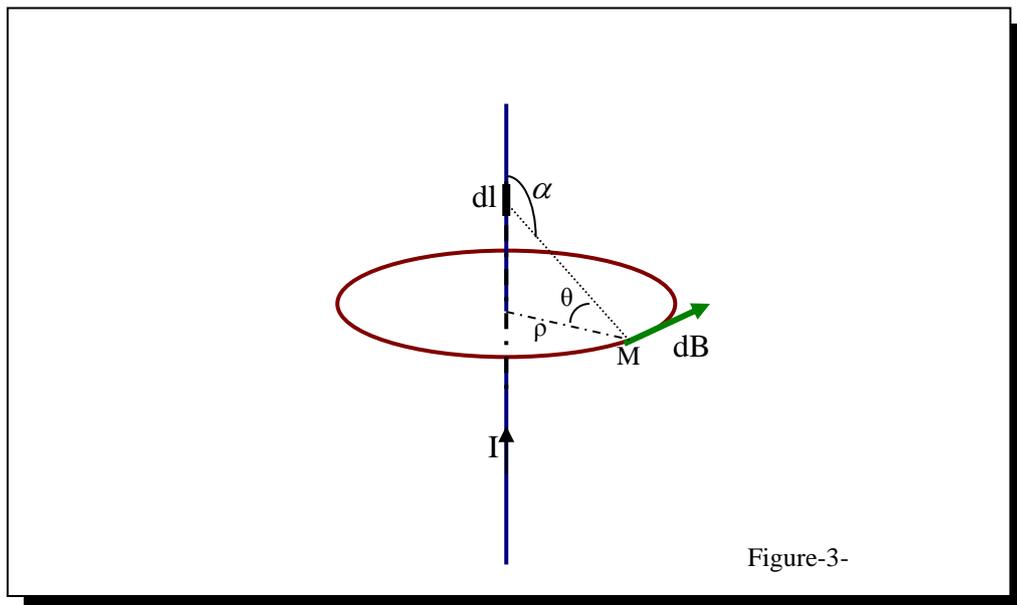
### III-1 Induction magnétique créée par un courant :

#### a- Formule de biot et savart :

soit un élément dl parcouru par un courant I. Il crée en un point M de l'espace un

champ magnétique dont le vecteur induction magnétique est :  $dB = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot dl}{4\pi \cdot r^2} \cdot \sin \alpha$

**Exemple 1 :** Induction magnétique créée par un courant rectiligne (infini) :(figure :3)



$$dB = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{4\pi \cdot r^2}$$

Or  $\alpha = \pi - (\frac{\pi}{2} - \theta) = \frac{\pi}{2} + \theta \rightarrow \sin \alpha = \cos \theta$

$$\rightarrow dB = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot dl \cdot \cos \theta}{4\pi \cdot r^2}$$

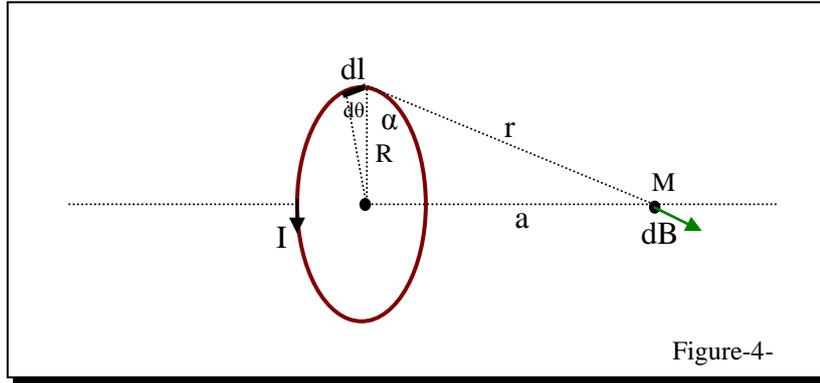
on a  $l = \rho \cdot \tan \theta \rightarrow dl = \rho \cdot (1 + \tan^2 \theta) d\theta$

$$r = \rho \cdot \cos \theta \rightarrow r = \frac{\rho}{\cos \theta}$$

$$dB = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot \rho} \cdot \cos \theta \cdot d\theta \rightarrow \boxed{B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot \rho}}$$

**Sens:** observateur d'ampère couché sur le conducteur tel que le courant lui entre par les pieds et lui sort par la tête et regarde le point M ; le sens de B est donné par son bras gauche.

**Exemple 2 :** Induction magnétique créée par un courant circulaire en un point M de son axe :(figure :4)



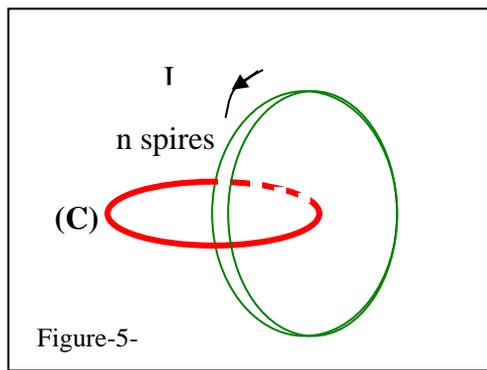
$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2} \text{ avec } \alpha = (\vec{dl}, \vec{r}) \text{ or } \alpha = \frac{\pi}{2} \rightarrow dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

$$\text{on a } dl = R d\theta \rightarrow B = \int_0^{2\pi} \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} R d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^2} 2\pi R$$

$$B = \frac{\mu_0 I R}{2r^2}$$

**b- théorème d'ampère:**

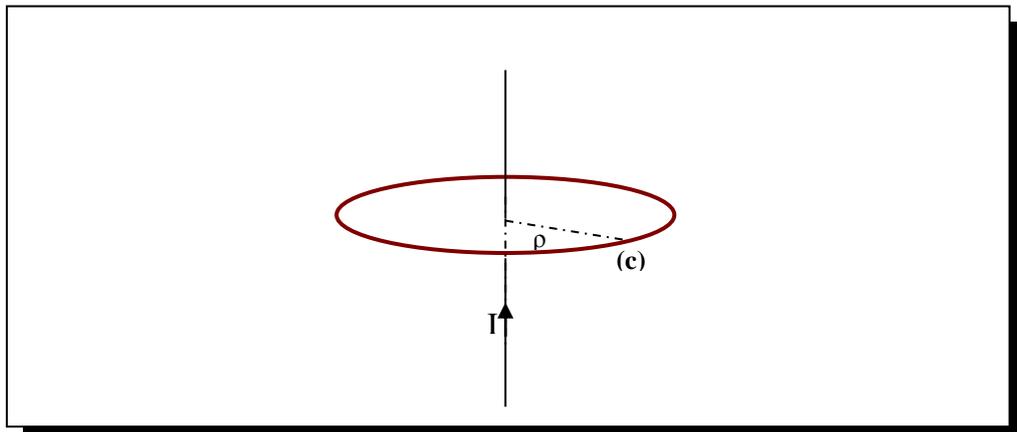
cette méthode convient surtout au cas où la boucle (C) est un cercle et lorsque H est le même en tous point du cercle.



La circulation du champ magnétique H le long de la boucle (C) est égale à la somme des courants qui sont embrassés par la boucle.

$$\oint \vec{H} \cdot \vec{dl} = ni$$

**Exemple 1 : Courant rectiligne (figure :6)**



$$\oint \vec{H} \vec{dl} = ni$$

Figure-6-

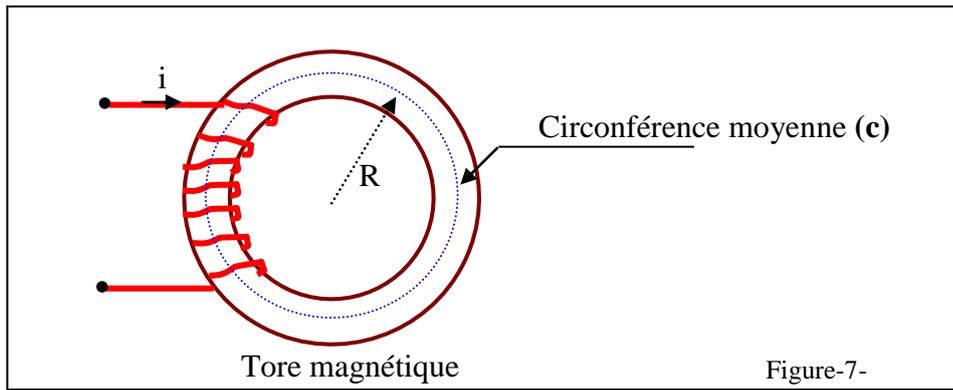
$n=1$  et  $H$  est constant en tout point de la boucle  $\rightarrow H \oint dl = i \rightarrow H 2\pi\rho = i$

$$\rightarrow H = \frac{i}{2\pi\rho}$$

$\rightarrow$

$$B = \mu_0 \cdot \frac{i}{2\pi\rho}$$

**Exemple 2 :** tore électromagnétique (figure :7)



Le champ magnétique  $H$  est constant en tout point de la circonférence moyenne (c)

$$\rightarrow \oint \vec{H} \vec{dl} = ni \rightarrow H \oint dl = ni \rightarrow H \cdot 2\pi R = ni$$

$$B = \mu \cdot \frac{ni}{2\pi R}$$

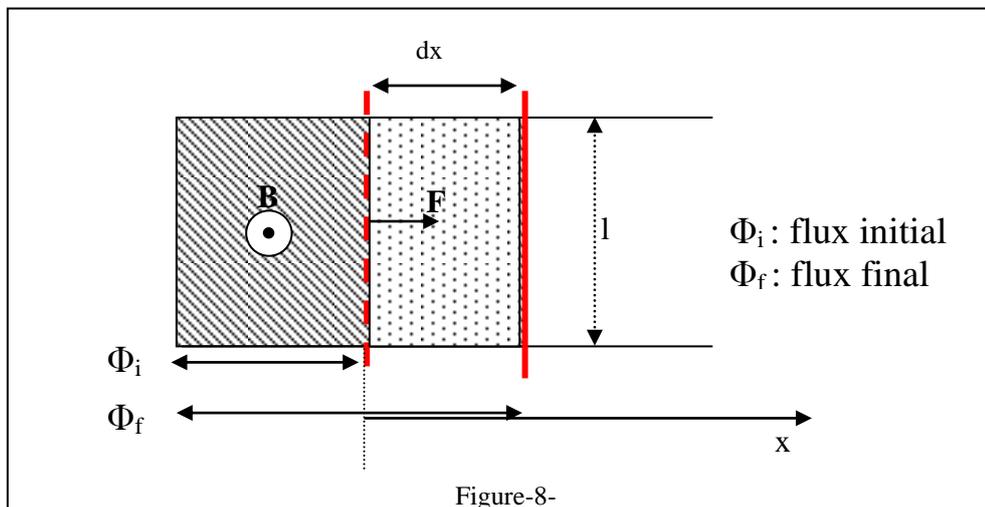
**IV- Induction électromagnétique :**

**VI-1 Force électromotrice induite :**

quand un circuit subit une variation de flux  $d\Phi$  pendant le temps  $dt$ , il devient le siège d'une f.é.m d'induction.

$$e = -\frac{d\phi}{dt}$$

**Exemple :** (figure :8)



$$e = -\frac{d\phi}{dt} \text{ or } \phi = B.S \rightarrow e = -B\frac{dS}{dt} = -B.l.\frac{dx}{dt} = -B.l.v \rightarrow \boxed{e = -B.l.v}$$

Au lieu de variation de flux embrassé par le circuit, on dit généralement de façon plus imagée, que  $d\Phi$  représente le flux coupé par la portion du conducteur.

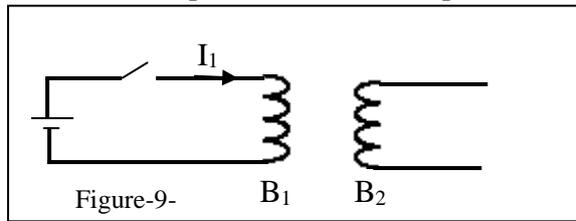
**IV-2 Sens de la f.é.m induite :**

Loi de Lenz : la f.é.m induite s’oppose à la cause qui la produit, c’est à dire tend à engendrer un courant (si le circuit est fermé) dont l’effet magnétique s’oppose à toute variation de flux.

**V- Induction mutuelle :** auto-induction

**V-1 Induction mutuelle :** phénomène d’induction mutuelle.

Deux bobines fixes  $B_1$  et  $B_2$  sont en présence, quand on fait passer un courant  $I_1$  dans la bobine  $B_1$ , une partie  $\Phi_{12}$  du flux créé par  $B_1$  est embrassé par  $B_2$  : (figure :9)



De même quand on fait passer un courant  $I_2$  dans la bobine  $B_2$ , une partie  $\Phi_{21}$  du flux créé par  $B_2$  est embrassé par  $B_1$ .

Si les deux bobines sont dans le vide où dans l’air :

$\Phi_{12}$  est proportionnel à  $I_1$      $\Phi_{12} = M_{12}.I_1$

$\Phi_{21}$  est proportionnel à  $I_2$      $\Phi_{12} = M_{21}.I_2$

L’expérience montre que  $M_{12} = M_{21} = M$

$M$  est appelé l’inductance mutuelle dont l’unité est le **Henry (H)**

**V-2 Inductance d’une bobine sans faire :(dans l’air)**

D’après la formule de biot et savart l’induction  $B$  en tout point de l’espace est proportionnelle au courant  $I$  qui traverse la bobine. Il en résulte que le flux  $\Phi$  propre total de la bobine est proportionnel à  $I \rightarrow \boxed{\Phi = LI}$

**V-3 Inductance d’une bobine avec noyau magnétique :**

Cette inductance n’est constante que si le flux propre est proportionnel à  $I$ . Cela n’est vraie tant que la perméabilité relative du fer ( $\mu_r$ ) n’est pas constante.

**VI- Théorie du circuit magnétique :**

**VI-1 Propriétés :**

La théorie du circuit magnétique est basée sur :

1/ deux propriétés remarquables du flux d'induction :

a/ il décrit un circuit fermé : chaque ligne d'induction est une boucle fermée.

b/ il est conservatif c'est à dire qu'il est le même à travers toute les sections, toute comme l'intensité du courant électrique.

2/ une remarquable analogie de formule :

Dans un circuit électrique  $I = \frac{E}{\sum R} = \frac{E}{\sum \rho \frac{l}{S}}$

Dans un circuit magnétique  $\Phi = \frac{ni}{\sum \rho_m \frac{l}{S}} = \frac{ni}{\sum \mathfrak{R}}$

-  $\mathfrak{R}$  :réluctance du circuit magnétique,  $\mathfrak{R} = \int_a^b \frac{dl}{\mu.S}$



-  $\rho_m = \frac{1}{\mu}$  : résistivité magnétique,

-  $ni = F$  : force magnétomotrice

**VI-2 Caractéristiques des circuits magnétiques :**

**Cycle d'hystérésis : (figure :10)**

A partir d'un point (H,B) de la courbe de la première aimantation on diminue le champ H, L'induction B ne repasse pas sur la même courbe. En conséquence, B nulle ne correspond plus à une valeur nulle de H. Il subsiste une induction rémanente  $B_r$  (induction qui demeure après la disparition du champ).Le champ d'excitation doit s'inverser pour annuler B , c'est le champ coercitif  $H_c$  (le champ à appliquer pour annuler l'induction).l'induction maximal est l'induction de saturation  $B_{max}$

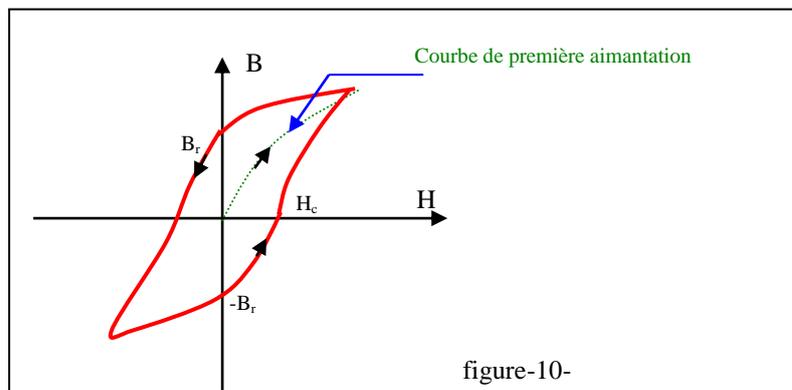
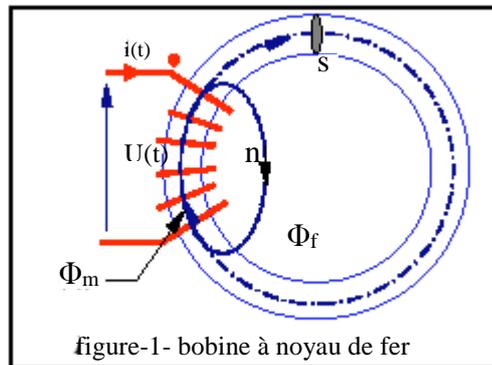


figure-10-

## Bobine à noyau de fer

### I-description :

Elle est constituée d'un circuit magnétique (matériau ferromagnétique) en tôles minces et une bobine de  $n$  spires dont la résistance est  $r$ . **figure-1-**  
Cet élément est essentiellement alimenté en régime sinusoïdal et la réponse des grandeurs électriques et magnétiques est fortement liée au comportement saturé ou non du matériau.



### II- Symbole :



(la barre représente le noyau du circuit magnétique).

### III- Généralité :

Soient

- $S$  : section du circuit magnétique,
- $l$  : longueur de la circonférence moyenne du circuit magnétique,

la force magnétomotrice  $ni$  crée un champ magnétique  $H$  qui est constant en tout point de circonférence.

D'après la loi d'ampère  $\oint_{(c)} h dl = ni \rightarrow H \oint_{(c)} dl = ni \rightarrow H = \frac{ni}{l}$  et  $B = \mu \frac{ni}{l}$

La bobine est donc traversée par un flux total  $\Phi_t = n \cdot \Phi = n \cdot B \cdot S = \frac{n^2}{\mu S} i$

$\rightarrow \Phi_t = L \cdot i$

$L$  est appelé inductance propre de la bobine, et  $R = \frac{l}{\mu S}$  est appelé réluctance du circuit

magnétique  $\rightarrow \boxed{L = \frac{n^2}{R}}$

si le courant  $i(t)$  est variable, le flux est aussi et par conséquence d'après la loi de faraday, il apparaît aux bornes de la bobine une f.é.m  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$

**IV- Bobine à noyau de fer :**

La force magnétomotrice ni créée un flux  $\Phi = \Phi_m + \Phi_f$  : **figure-2-**  
 $\Phi_m$  : flux de magnétisation (canalisé dans le circuit magnétique).

$\Phi_f$  : flux de fuite( circulant dans l'air).

En tenant compte de la résistance de la bobine r on a :

$$u(t) = ri(t) + n \frac{d\Phi}{dt} = ri(t) + n \frac{d(\Phi_m + \Phi_f)}{dt}$$

$$u(t) = ri(t) + n \frac{d\Phi_m}{dt} + n \frac{d\Phi_f}{dt}$$

le flux de fuite est canalisé dans l'air, il est donc proportionnel au courant qui traverse la bobine

$$\rightarrow n\Phi_f = l_f i \quad (l_f \text{ est l'inductance de fuite) .}$$

le flux magnétisant est canalisé dans un circuit magnétique dont la perméabilité dépend de B.

$$\rightarrow u(t) = ri(t) + n \frac{d\Phi_m}{dt} + l_f \frac{di}{dt}$$

on pose  $e(t) = -n \frac{d\Phi_m}{dt}$

Si les grandeurs sont sinusoïdaux, l'écriture complexe de cette dernière équation donne :

$$\underline{U} = r\underline{I} + j l_f \omega \underline{I} - \underline{E}$$

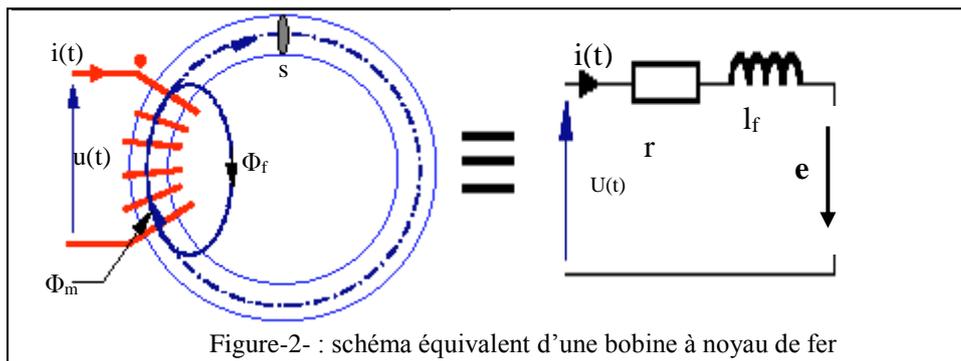


Figure-2- : schéma équivalent d'une bobine à noyau de fer

**IV-1 Diagramme de fonctionnement : figure-3-**

·  $\underline{E} = j n \omega \underline{\Phi}_m \rightarrow -E$  est en avance de  $\frac{\pi}{2} / \underline{\Phi}_m$

·  $l_f \underline{I} = n \underline{\Phi}_f \rightarrow \underline{I}$  et  $\underline{\Phi}_f$  sont en phase

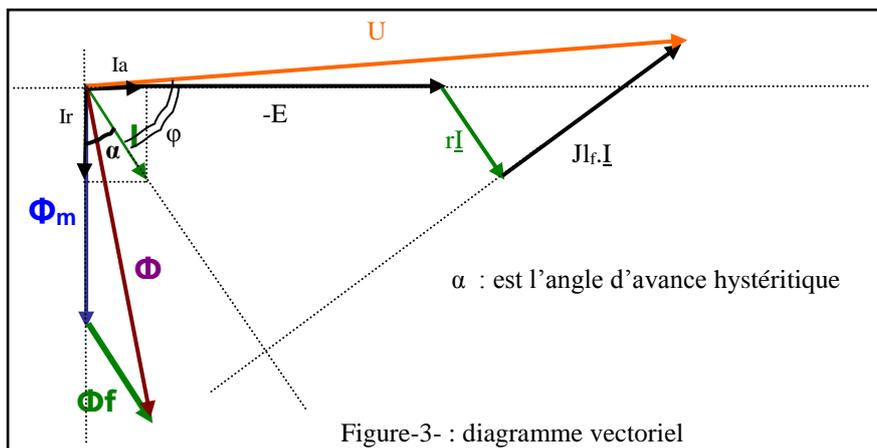


Figure-3- : diagramme vectoriel

- le terme  $(E \cdot I_a)$  représente les pertes actives dans le fer ( $P_{fer}$ ).
- le terme  $(E \cdot I_r)$  représente les pertes réactives magnétisante dans le circuit magnétique ( $Q_{fer}$ ).

On déduit de ce qui procède que le circuit magnétique peut être remplacé par un schéma équivalent contenant une résistance  $R_f$  montée en parallèle avec une inductance de réactance  $X_f$ . **figure-4-**

**IV.2 Etablissement du schéma équivalent :**

- La puissance active  $P_{fer}$  est consommée par une résistance  $R_f$  soumise à la tension  $u(t)$  et parcourue par le courant actif  $I_a$ .

$$\Re_f = \frac{U^2}{P_{fer}}$$

- La puissance réactive consommée traduit le déphasage entre le courant  $I$  et la tension : elle est matérialisée par une réactance  $X_f$  soumise à la tension  $u(t)$  parcourue par le courant réactif  $I_r$ .

$$X_f = l_f \cdot w = \frac{U^2}{Q_{fer}}$$

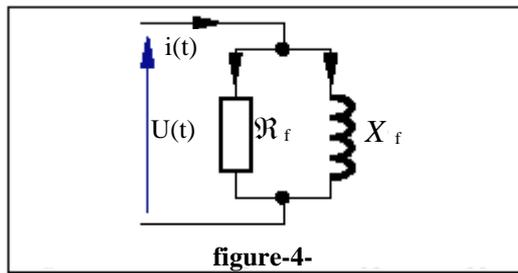


figure-4-

La touche finale consiste à adjoindre au modèle ci-dessus et l'assimilation du courant à un équivalent sinusoïdal, la résistance  $r$  de l'enroulement et l'inductance  $l_f$  de fuite : **figure-5-**

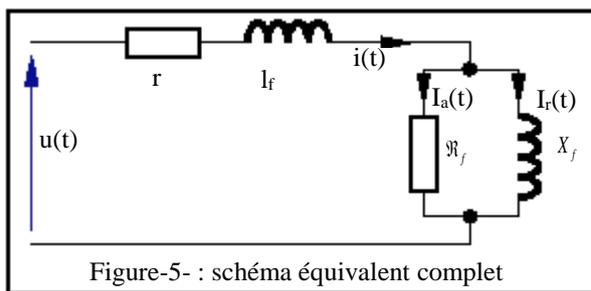


Figure-5- : schéma équivalent complet

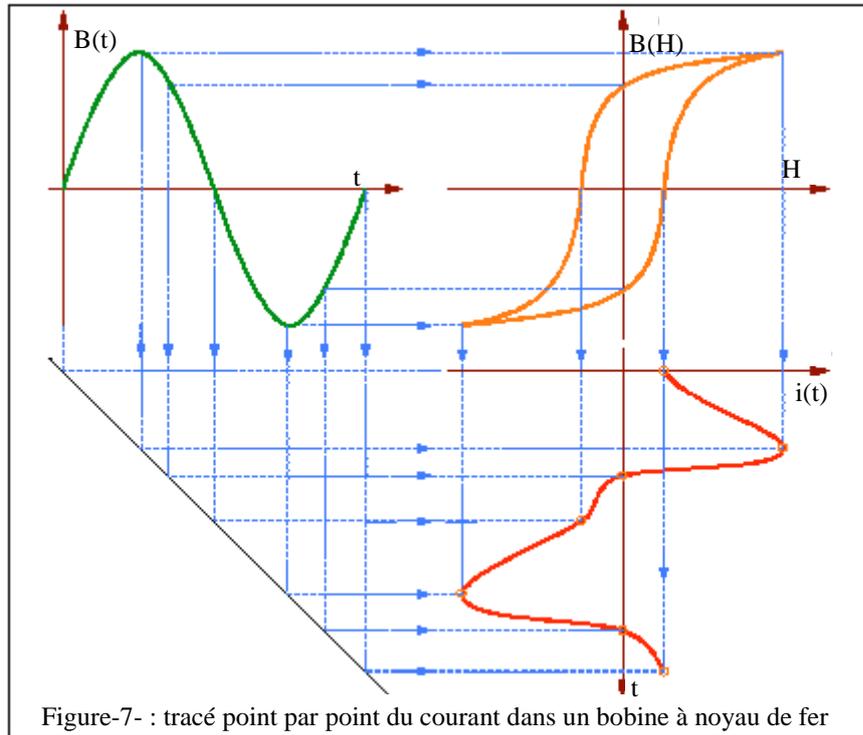
**IV.3 Comportement temporel des différentes grandeurs :**

Comment passer de la tension au courant si les comportements ne sont pas linéaires ?

Le schéma de la **figure-6-** montre le cheminement qui permet de tracer l'allure du courant **figure-7-**

$$u(t) = U\sqrt{2} \cos wt \longrightarrow \Phi(t) = \Phi_{max} \sin wt \longrightarrow B(t) = B_{max} \sin wt \longrightarrow H(t) \longrightarrow i(t)$$

Figure-6-Les étapes menant de la tension sinusoïdal au courant



Le courant dans la bobine est périodique mais non sinusoïdal. Il est d'autant plus «déformé» que le circuit magnétique est saturé.

La distorsion du signal est marquée par le taux d'harmoniques. Si la déformation est faible, une **approximation au premier harmonique** est envisageable. On ne travaille alors qu'avec le courant fondamental.

Dans le cas général, il faut envisager l'influence de toutes les harmoniques. Dans ces conditions, on recherche une représentation sinusoïdale du courant qui transporte la même puissance que le courant réel. Cette équivalence est obtenue en travaillant avec la puissance.

**IV.4 Les pertes dans les bobines à noyau de fer :**

Avant d'entamer une analyse énergétique plus fine, il est important de préciser l'origine des différentes pertes qui apparaissent dans le circuit magnétique d'une bobine.

**IV.4.1 Pertes par courants de Foucault :**

Les matériaux ferromagnétiques ont souvent des propriétés conductrices pour le courant électrique : en présence d'un flux variable, la fem induite crée les courants de Foucault qui circulent dans le matériau.

L'effet Joule dissipe l'énergie sous forme de chaleur, ce sont les **pertes par courants de Foucault**.

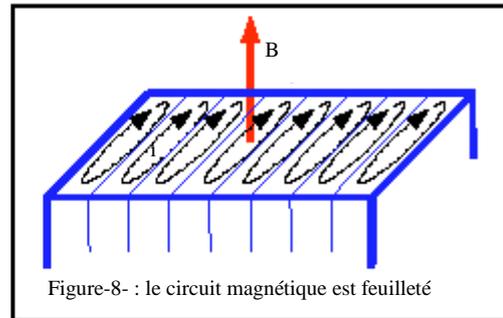
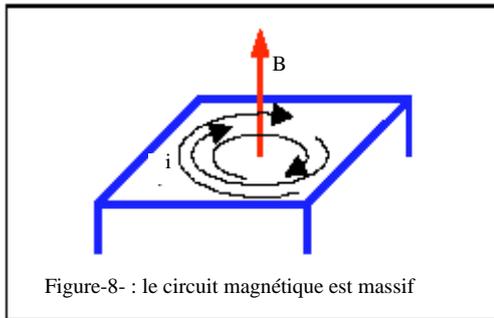
Evaluation des pertes par courants de Foucault

Les pertes par courants de Foucault sont de la forme (résultat non démontré) :

$$P_F = k \frac{B_M^2 f^2}{\rho}$$

Moyens de réduction des pertes :

- Utiliser un matériau plus résistif : fer avec addition de silicium, ferrite.
- Augmenter la résistance au passage des courants (**figure-8-** et **figure-9-**) : circuit magnétique composé de tôles (feuilletage) isolées entre elles par oxydation surfacique.



#### IV.4.2 Pertes par hystérésis :

Les pertes proviennent de la différence entre l'énergie emmagasinée durant la croissance de H et celle restituée lors de la décroissance. Pour un parcours complet du cycle, l'énergie est proportionnelle à son aire (  $A_H$  ) et au volume du matériau (V). Ces pertes sont d'autant plus importantes que le nombre de cycles par seconde est élevé. Une tension évoluant à la fréquence f, crée des grandeurs magnétiques évoluant à cette fréquence. Les pertes s'expriment par :

$$P_H = K_H \cdot B_M^2 \cdot f$$

#### IV.4.3. Globalisation des pertes : pertes fer

Les pertes fer constituent l'ensemble des pertes dans le matériau :

On remarquera que les deux types de pertes sont proportionnelles au carré de l'induction maximale.

Pour la fréquence, les pertes par hystérésis sont proportionnelles et celles par courants de Foucault dépendent du carré. Cette distinction permet d'effectuer des méthodes de séparation des pertes.

$$P_{fer} = P_H + P_F = K_f \cdot B_M^2 \cdot f^2 + k_H \cdot B_M^2 \cdot f$$

#### IV.5 Technologie et applications des bobines à noyau de fer :

##### IV.5.1 Eléments de technologie de réalisation :

L'apparence d'une bobine à noyau de fer est différente suivant l'utilisation.

En règle générale, il faut s'approcher des circuits magnétiques parfaits. Pour diminuer les fuites magnétiques, les enroulements sont placés au plus près du circuit magnétique. La disposition pratique consiste à utiliser un circuit magnétique cuirassé (**Figure-10-**) ou torique (**Figure 11**).

Pour limiter les pertes par courants de Foucault, le circuit magnétique est feuilleté en basse fréquence. Pour les utilisation à des fréquences plus élevées, on a recours à la ferrite dont la résistance électrique est importante.

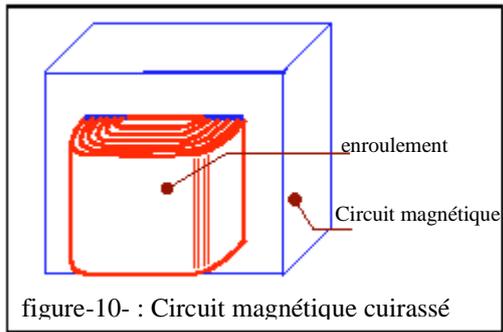


figure-10- : Circuit magnétique cuirassé

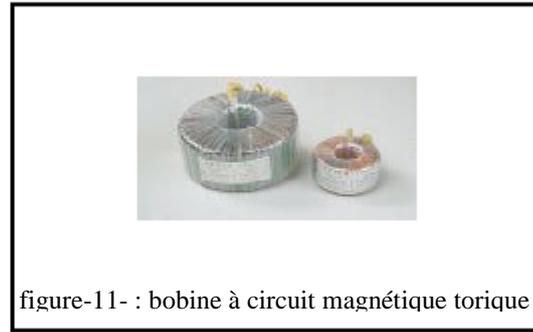


figure-11- : bobine à circuit magnétique torique

#### IV.5.2 Applications

En Electrotechnique, on rencontre les bobines à noyau de fer dans les électro-aimants (relais, contacteurs), les bobines de lissage du courant., les bobines d'usage courant, les plateau magnétique de machine-outil...

En électronique, on les trouvent dans les inductances de filtrage, les selfs HF ajustables ou non.

## Les Transformateurs monophasés

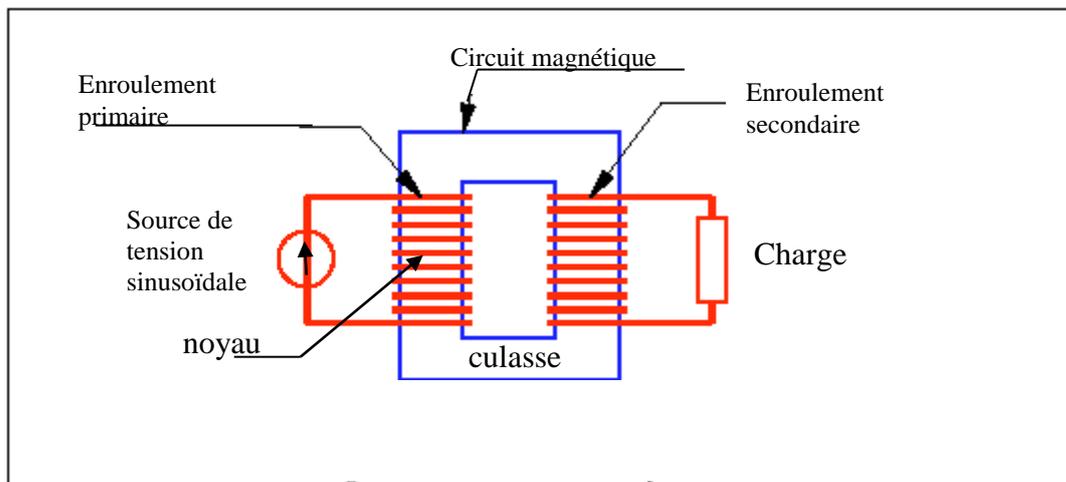
### I- constitution :

Un transformateur monophasé se compose de deux enroulements : (figure-1-)

- Non reliés électriquement,
- Enlaçant un même circuit magnétique,

#### a/ circuit magnétique :

- Deux noyaux (ou colonne),
- Deux culasses (ou traverse) réunissant les noyaux.



### b/ Les enroulements :

Chacun des deux enroulements est réparti sur les deux noyaux :

- L'un est relié à la source, il se comporte comme un récepteur( enroulement primaire),
- L'autre est relié à la charge, il se comporte comme un générateur(enroulement secondaire).

Les deux enroulements ont en général des nombres de spires différents :

Celui qui a le nombre de spires le plus grand est l'enroulement haute tension (HT), l'autre est l'enroulement basse tension(BT).

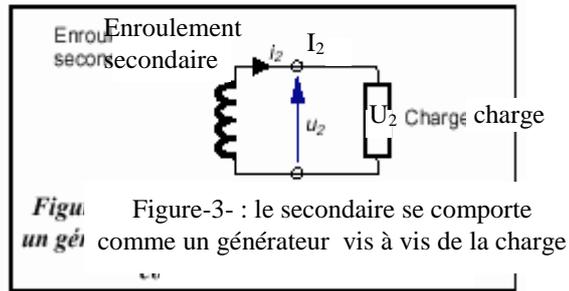
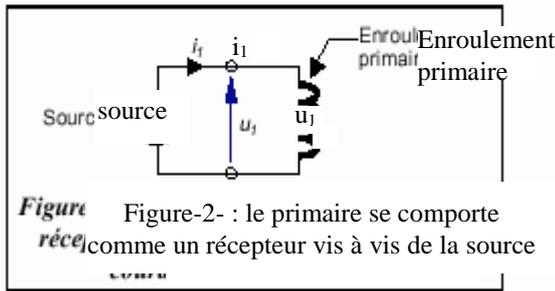
### II- Notations utilisées

On adopte différentes notations suivant les parties du transformateur que l'on décrit :

- primaire : indice **1** ;
- secondaire : indice **2** ;
- grandeurs à vide : indice **0** ;
- grandeurs nominales : indice **n** ;
- grandeurs en court-circuit : indice **cc**.

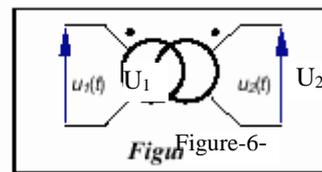
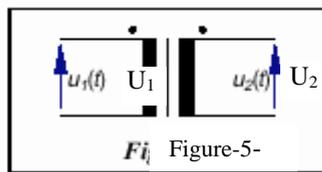
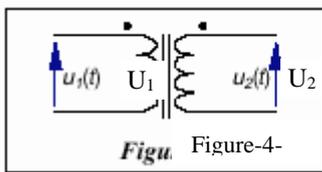
C'est le courant primaire qui impose le sens positif du flux dans le circuit magnétique.

Le marquage des tensions et des courants traduit le sens de transfert de l'énergie : **figure 2 et 3**



**III- Symbolisations :**

Les trois figures suivantes représentent les symboles des transformateurs les plus souvent rencontrés.

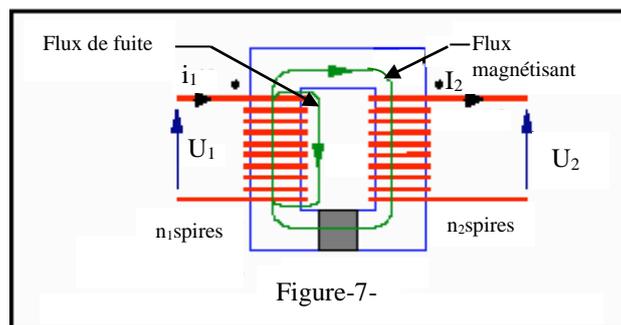


**III. Fonctionnement du transformateur à vide**

**III.1. Mise en place**

Le transformateur comporte deux enroulements de résistances  $r_1$  et  $r_2$  comportant  $n_1$  ou  $n_2$  spires (Figure 7). Le primaire reçoit la tension  $u_1(t)$  et absorbe le courant  $i_0(t)$ . Le secondaire délivre la tension  $u_2(t)$  et un courant  $i_2(t)$  nul puisqu'il est à vide.

Le flux  $\Phi(t)$  créé par l'enroulement primaire se décompose en un flux de fuite au primaire  $\Phi_f(t)$  auquel s'ajoute le flux magnétisant  $\Phi_m(t)$  dans le circuit magnétique.



**III.2. Mise en équation**

- Mise en équation des tensions

le comportement du primaire est celui d'une bobine à noyau de fer.

$$u_1 = n_1 \cdot I_0 + m \frac{d\Phi}{dt} = n_1 \cdot I_0 + m \frac{d\Phi_f}{dt} + m \frac{d\Phi_m}{dt}$$

- Considérations sur les courants

Le courant au primaire n'est pas sinusoïdal. Pour y remédier, on effectue l'hypothèse de sinusoïdalité du courant primaire. En conséquence et d'après le théorème d'Ampère, le champ d'excitation, le champ d'induction et donc le flux sont des grandeurs sinusoïdales.

Dans ces conditions, on peut utiliser leur notation complexe :  $\Phi \rightarrow \underline{\Phi}$ ,  $i \rightarrow \underline{I}$ ,  $u \rightarrow \underline{U}$  et  $e \rightarrow \underline{E}$ .

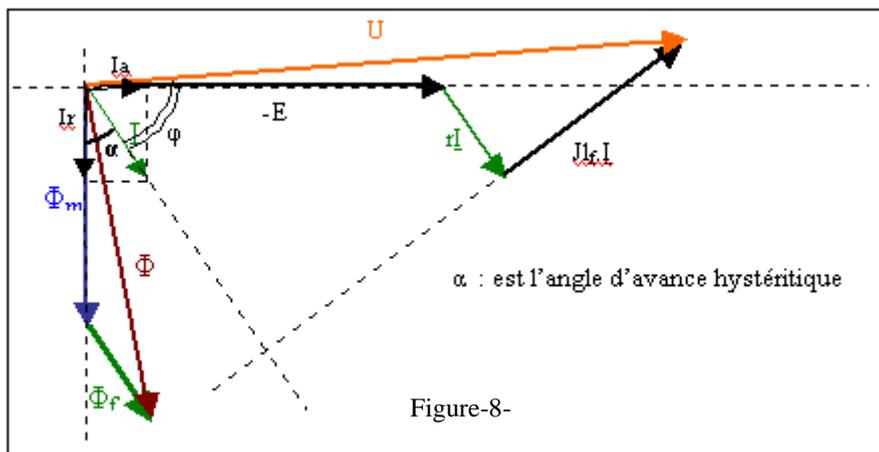
Compte tenu de l'hypothèse précédente l'équation complexe des tensions s'écrit ;

$$\underline{U}_1 = r_1 \underline{I}_0 + j l f \cdot w \cdot \underline{I}_0 + j n_1 w \cdot \underline{\Phi}_m$$

$$n_1 \underline{\Phi} = n_1 (\underline{\Phi}_f + \underline{\Phi}_m)$$

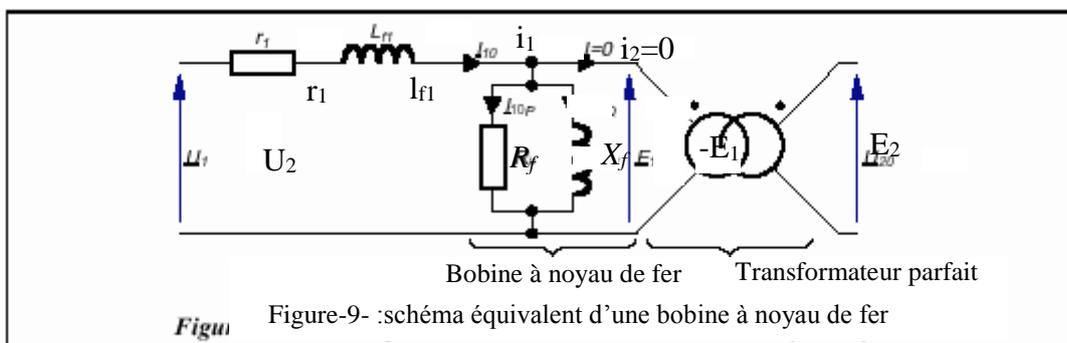
**III-3 Diagramme de fonctionnement : figure-8-**

- $-\underline{E} = j n w \cdot \underline{\Phi}_m \rightarrow -E$  est en avance de  $\frac{\pi}{2}$  /  $\underline{\Phi}_m$
- $I_f \underline{I} = n \underline{\Phi}_f \rightarrow \underline{I}$  et  $\underline{\Phi}_f$  sont en phase
- 



**Etablissement du schéma équivalent :**

On retrouve le comportement d'une bobine à noyau de fer. (Figure 9)



**Définition et description d'un transformateur parfait :**

Le transformateur parfait est un appareil idéal pour le quel :

- les résistances  $r_1$  et  $r_2$  des deux enroulements sont nuls ,
- le flux de fuite est nul,
- le courant  $i_0$  est nul.

Le fonctionnement d'un tel appareil régit par les trois équations :

1/ la loi d'ohm au primaire  $u_1 = -e_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}$  ,

2/ la loi d'ohm au secondaire  $u_2 = e_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}$

3/ relation entre courants  $i_1 = -m i_2$  avec  $m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{u_2}{u_1}$

Le rendement est unitaire  $\rightarrow P_1(t) = P_2(t)$

**Bilan de puissance :**

A vide, le transformateur absorbe une puissance active  $P_{10}$  et une puissance réactive  $Q_{10}$ .

Pour effectuer le bilan des puissances, on utilise le théorème de Boucherot :

\*  $P_{10} = n \cdot I_0^2 + \frac{E_{10}^2}{R_f}$  avec  $n \cdot I_0^2$  représente les pertes joules dans la résistance de l'enroulement

primaire et  $\frac{E_{10}^2}{R_f}$  représente les pertes fer dans le circuit magnétique.

On peut aussi écrire  $P_{10} = U_1 \cdot I_0 \cdot \cos \varphi_{10}$

\*  $Q_{10} = l_f \cdot w \cdot I_0^2 + \frac{E_{10}^2}{l_f \cdot w}$  avec  $l_f \cdot w \cdot I_0^2$  représente la puissance réactive de fuite dans l'enroulement

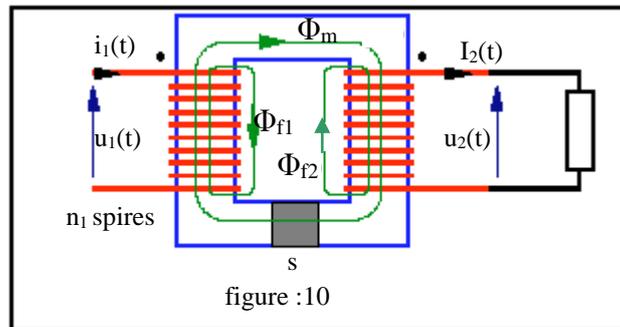
primaire et  $\frac{E_{10}^2}{l_f \cdot w}$  représente la puissance magnétisante du circuit magnétique.

On peut aussi écrire  $Q_{10} = U_1 \cdot I_0 \cdot \sin \varphi_{10}$

### IV- Fonctionnement du transformateur en charge

#### IV.1 Mise en place

La présence d'un courant dans le bobinage secondaire a pour effet l'existence d'un flux de fuite  $\Phi_{f2}$  émanant de cet enroulement et nécessite la prise en compte de la résistance de l'enroulement secondaire (figure-10-).



#### IV.2. Mise en équation

Mise en équations des flux

Flux total embrassé par les  $n_1$  spires du primaire :  $\Phi_1 = n_1(\Phi_m + \Phi_{f1})$

Flux total embrassé par les  $n_2$  spires du secondaire :  $\Phi_2 = n_2(\Phi_m + \Phi_{f2})$

Mise en équation des tensions et des courants :

$$u_1 = r_1 \cdot i_1 + n_1 \frac{d\Phi_1}{dt} = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\Phi_m}{dt} + l_{f1} \frac{di_1}{dt} \rightarrow u_1 = n_1 \dot{\Phi}_m + l_{f1} \frac{di_1}{dt} - e_1$$

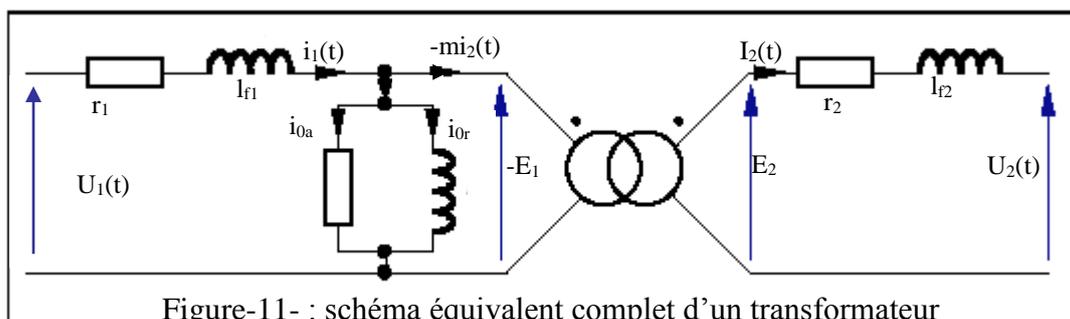
$$u_2 = -r_2 i_2 - n_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = -r_2 i_2 - n_2 \frac{d\Phi_m}{dt} - l_{f2} \frac{di_2}{dt} \rightarrow e_2 = r_2 i_2 + l_{f2} \frac{di_2}{dt} + u_2$$

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = n_1 i_0 \rightarrow i_1 = i_0 - m i_2$$

#### IV-3 Etablissement du schéma équivalent

Au schéma équivalent à vide vient s'ajouter l'influence des éléments du secondaire.

On définit alors le schéma équivalent complet du transformateur en charge (Figure :11).



### IV-4 Bilan des puissances

Le bilan de toutes les puissances, actives ou réactives, qui apparaissent dans le transformateur peut être représenté de la façon suivante (**Figure :12**).

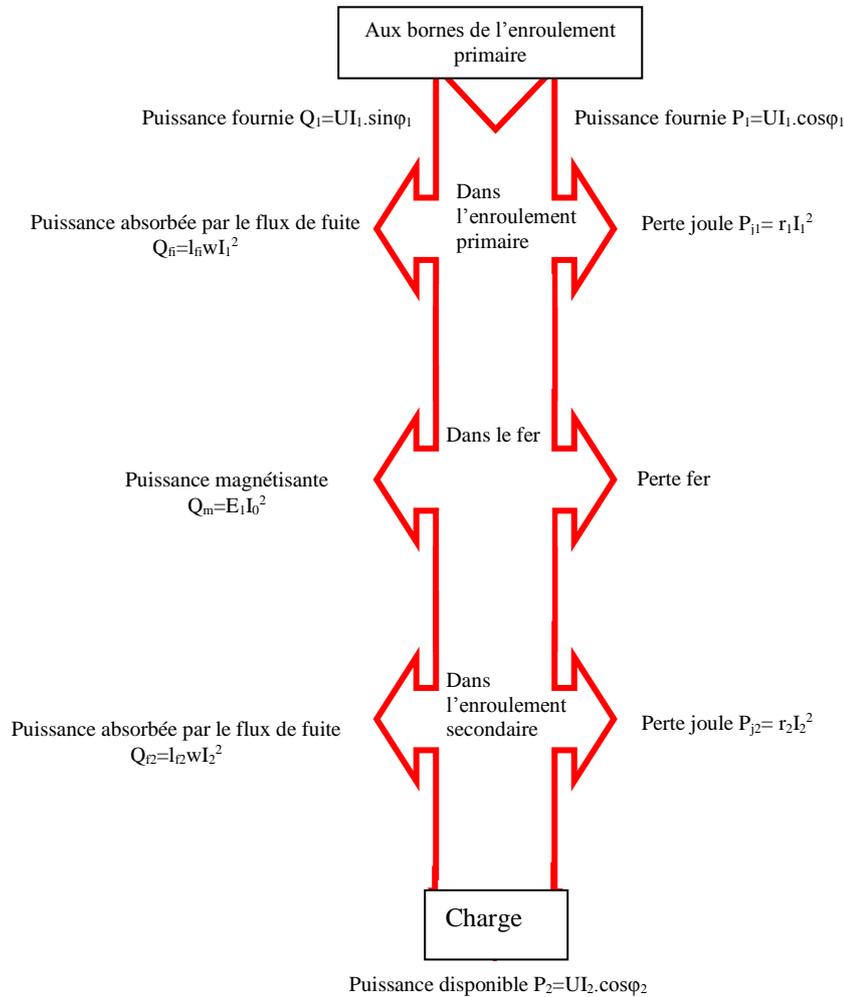


Figure-12- : bilan de puissance

### V- Comportement simplifié dans l'hypothèse de Kapp

Le courant  $i_0$  est négligé devant  $i_1$  et  $i_2$  au voisinage du fonctionnement nominal. On suppose donc le circuit magnétique parfait  $\rightarrow i_1 = -m i_2$

$$\rightarrow \underline{U}_1 = (r_1 + j l_{f1} w) \underline{I}_1 - \underline{E}_1$$

$$\rightarrow \underline{U}_2 = -(r_2 + j l_{f2} w) \underline{I}_2 + \underline{E}_2$$

$$\rightarrow \underline{E}_2 = -m \underline{E}_1$$

On en déduit donc le modèle équivalent en charge (figure-13-)

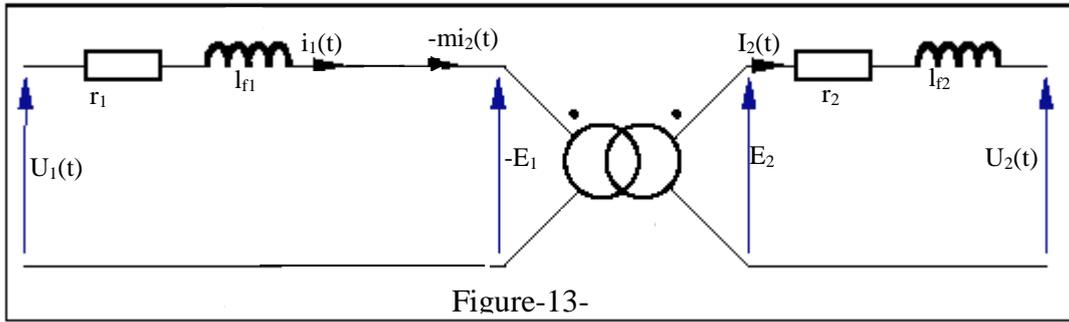


Figure-13-

**V-1 Etablissement du schéma équivalent simplifié ramenée au secondaire :**

Pour la charge, le transformateur peut être assimilé à un modèle de thévenin de f.é.m  $E_s$  et d'impédance  $Z_s$  qui lui fournirait le même courant  $i_2$  sous la même tension  $u_2$ .

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_s - \underline{Z}_s \underline{I}_2$$

On multiplie l'équation I par m :  $m\underline{U}_1 = m(r_1 + jl_{f1}w)\underline{I}_1 - m\underline{E}_1$  et on remplace  $I_1$  par  $-mI_2$ , on obtient  $m\underline{U}_1 = -m^2(r_1 + jl_{f1}w)\underline{I}_2 - m\underline{E}_1 \rightarrow -m\underline{E}_1 = -m^2(r_1 + jl_{f1}w)\underline{I}_2 - m\underline{U}_1$

$$\rightarrow \underline{U}_2 + (r_2 + jl_{f2}w)\underline{I}_2 = -m^2(r_1 + jl_{f1}w)\underline{I}_2 - m\underline{U}_1$$

$$\rightarrow -m\underline{U}_1 = (r_2 + jl_{f2}w)\underline{I}_2 + m^2(r_1 + jl_{f1}w)\underline{I}_2 + \underline{U}_2$$

$$\rightarrow -m\underline{U}_1 = (r_2 + m^2r)\underline{I}_2 + j(m^2l_{f1} + l_{f2})w\underline{I}_2 + \underline{U}_2$$

$$\rightarrow \underline{U}_2 = -(r_2 + m^2r)\underline{I}_2 - j(m^2l_{f1} + l_{f2})w\underline{I}_2 - m\underline{U}_1$$

$$\rightarrow \underline{U}_2 = -m\underline{U}_1 - \underline{Z}_s \underline{I}_2 = \underline{U}_{20} - \underline{Z}_s \underline{I}_2$$

avec  $\underline{Z}_s = R_s + jX_s$

- $-m\underline{U}_1 = \underline{U}_{20}$

- $R_s = m^2r_1 + r_2$

- $X_s = (m^2l_{f1} + l_{f2})w$

Cette relation se traduit par le schéma équivalent de la (figure:14)

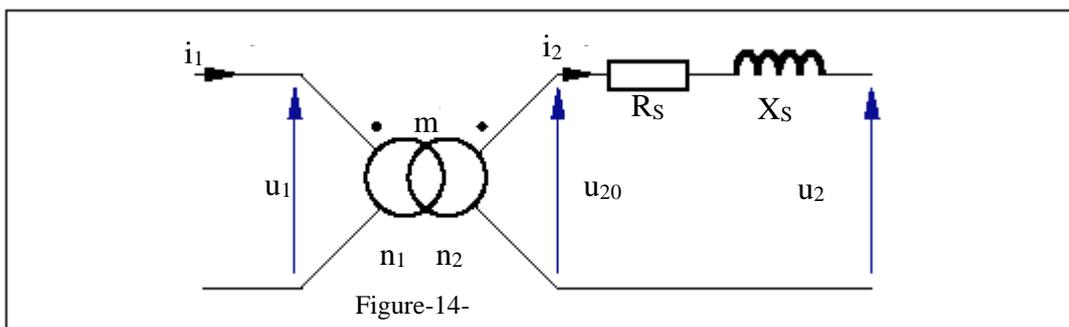
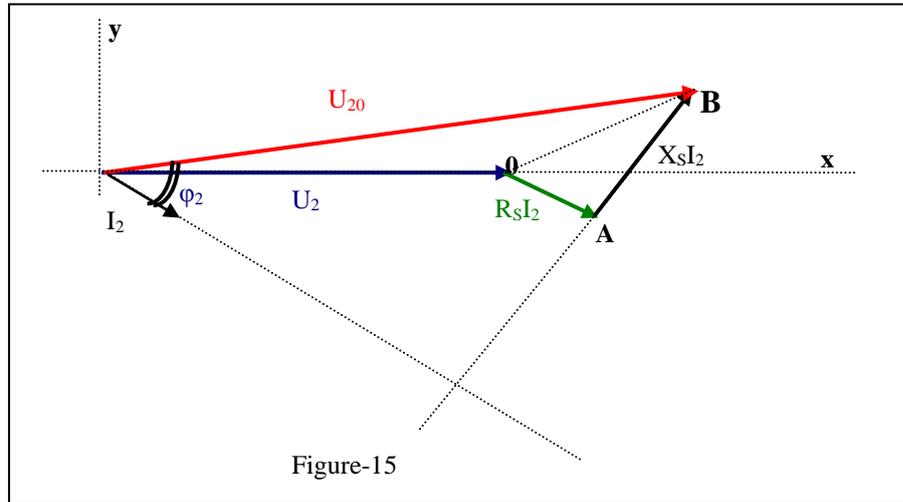


Figure-14-

**V-2 Détermination de la chute de tension :**

Les dimensions du triangle de Kapp ( OAB) sont faibles par rapport au module de  $U_2$  .Dans ces conditions  $U_2$  et  $U_{20}$  sont déphasés d'un angle  $\theta$  proche de zéro( $\cos\theta \approx 1$ ) (figure :15 )



Projection sur x :  $U_{20} \cos \theta = U_2 + R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2$ , puisque  $\theta$  faible la chute de tension approximative en charge :

$$\Delta U = U_{20} - U_2 = R_s I_2 \cos \varphi_2 + X_s I_2 \sin \varphi_2$$

**VI Rendement du transformateur :**

Le rendement d'un appareil est le rapport de la puissance restituée à la puissance fournie.

$$\eta = \frac{\text{puissance disponible au secondaire}}{\text{puissance totale absorbée au primaire}} = \frac{P_2}{P_1}$$

**VII Etude expérimental du transformateur :**

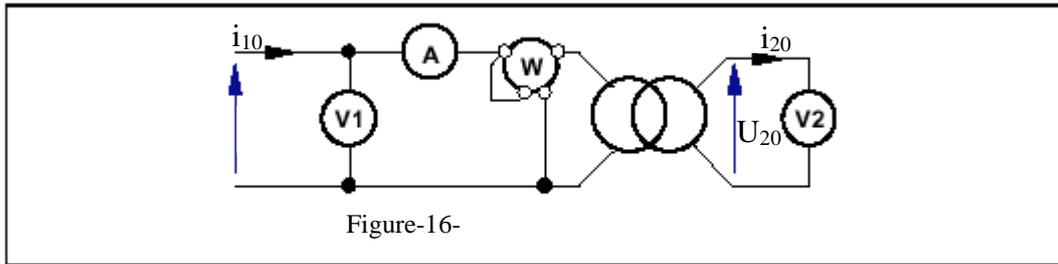
Cette étude à pour but de connaître le fonctionnement exact de l'appareil, c'est à dire de construire, sous une tension constante  $U_1$  (en générale égal à  $U_{1n}$  ) et avec un facteur de puissance  $\cos\varphi_2$  connu, les graphes de  $U_2=f(I_2)$  et  $\eta=f(I_2)$ .

Il alors prédéterminer ce fonctionnement, c'est à dire le prévoir à partir des résultats des deux essais n'exigeant que des puissances très faible :ce sont les essais à vide et en court-circuit.

**VII-1 Essai à vide sous tension nominale :**

Dans un essais à vide, les courants, et par conséquent les pertes joules, sont faibles.

On mesure les tensions primaire et secondaire à l'aide de voltmètres supposés parfaits (impédance infinie), le courant primaire (ampèremètre d'impédance nulle) et la puissance absorbée au primaire (figure :16)



On se place au régime nominal pour relever les grandeurs suivantes :

- Tension primaire  $U_1 = U_{1n}$  avec  $V_1$  ;
- Tension secondaire  $U_{20} = E_2$  avec  $V_2$  ;
- courant primaire à vide  $I_0$  qui n'est autre que le courant magnétisant avec  $A$  ;
- La puissance primaire  $P_{10}$  avec  $W$ .

### VII-1-1 Détermination de m

Puisque le transformateur est à vide, la chute de tension dans  $r_1$  et  $l_{f1}$  est très faible par rapport à  $E_1$ . La tension  $E_2 = U_{20}$  est mesurée. On a alors :

$$m = \frac{E_2}{E_1} = \frac{U_{20}}{U_{1n}}$$

### VII-1-2 Détermination des pertes fer matérialisées par la résistance $R_f$ :

La puissance  $P_{10}$  lue sur le wattmètre est entièrement consommée par le transformateur ; c'est à dire la somme :

- Des pertes fer  $P_{fer}$ ,
- Des pertes par effet joules  $r_1 \cdot I_0^2$  dans le primaire ;

$$P_{10} = r_1 I_0^2 + P_{fer}$$

comme  $I_0 \ll I_{1n}$  le terme  $r_1 \cdot I_0^2$  est très faible devant  $P_{fer}$

$$\rightarrow P_{10} \approx P_{fer}$$

$$\text{Or } P_{fer} = R_f I_{0a}^2 = \frac{E_1^2}{R_f} \approx \frac{U_1^2}{R_f} \rightarrow R_f \approx \frac{U_1^2}{P_{10}}$$

De même

$$X_f \approx \frac{U_1^2}{Q_{10}}$$

En conclusion, il faut tenir que :

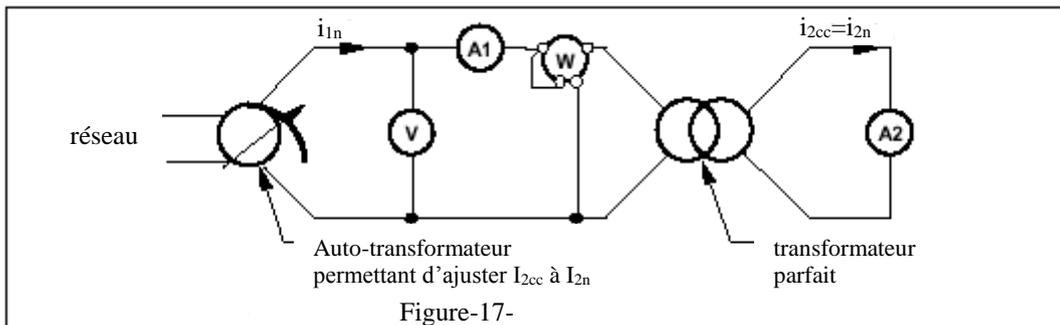
L'essai à vide permet de déterminer

- Le rapport de transformation  $m$ ,
- Les pertes fer  $P_{fer}$ .
- Les paramètres  $X_f$  et  $R_f$

**VII-2 Essai en court-circuit à courant secondaire nominal sous tension primaire réduite :**

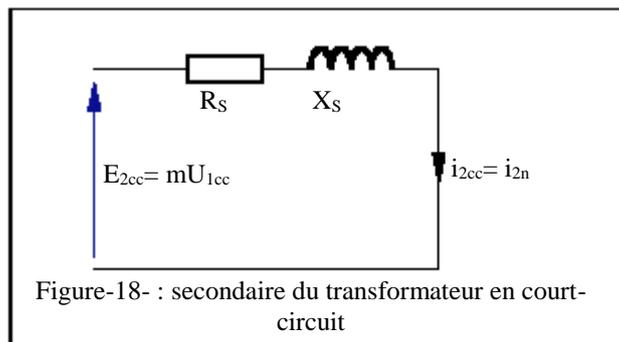
Dans un essai avec secondaire en court circuit, il faut limiter la tension primaire pour se placer au régime nominal de courant au secondaire. Dans ces conditions, les tensions sont faibles.

Pour amener le courant secondaire à la valeur nominale, la tension primaire est réglée avec un autotransformateur. On mesure la tension primaire à l'aide d'un voltmètre supposé parfait (impédance infinie), les courants primaire et secondaires (ampèremètres d'impédance nulle) et la puissance absorbée au primaire (Figure : 17).



**VII-2-1 Détermination de la résistance  $R_s$  et de la réactance  $X_s$  ramenées au secondaire :**

Puisque on se place au régime nominal de courant, on peut utiliser le schéma équivalent du transformateur dans l'hypothèse de Kapp : (figure :18)



Les pertes mesurées en court circuit sont les pertes Joule nominales :

$$P_{1cc} = R_s I_{2cc}^2$$

$$\rightarrow R_s = \frac{P_{1cc}}{I_{2cc}^2}$$

La réactance ramené au secondaire se déduit de la formule suivante :

$$X_S = \sqrt{\left(\frac{mU_{1cc}}{I_{2cc}}\right)^2 - R_S^2}$$

En conclusion, il faut tenir que :

l'essai en court-circuit permet de déterminer

- Les pertes joules,
- Les paramètres  $X_S$  et  $R_S$ .

### VIII- Exploitation des résultats expérimentaux :

la connaissance des éléments du modèle du transformateur permettent de prédéterminer le fonctionnement de l'appareil vis à vis de la charge :  $U_2=f(I_2)$  et  $\eta=f(I_2)$ .

$$U_2 = U_{20} - ( R_S I_2 \cos \varphi_2 + X_S I_2 \sin \varphi_2 )$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + R_S I_2^2 + P_{fer}}$$

## Les transformateurs triphasés

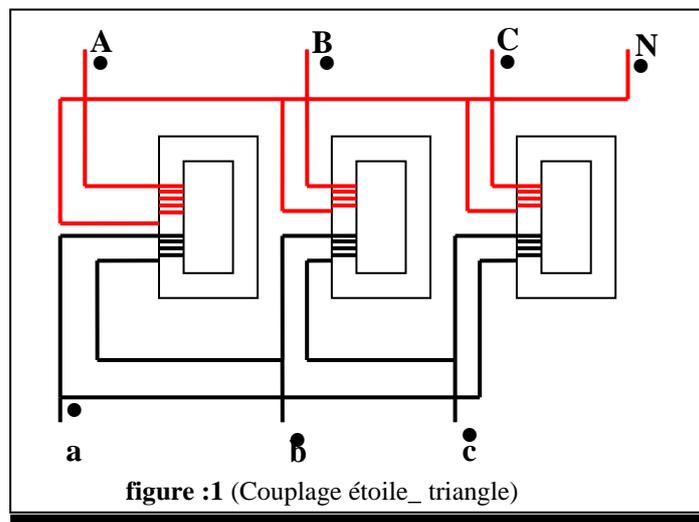
Les transformateurs triphasés (élévateurs ou abaisseurs de tension) sont très nombreux dans les réseaux appartenant aux sociétés distributrices de l'énergie électrique.

### I. Description des transformateurs triphasés :

Dans les réseaux triphasés il existe deux possibilités pour les transformateurs.

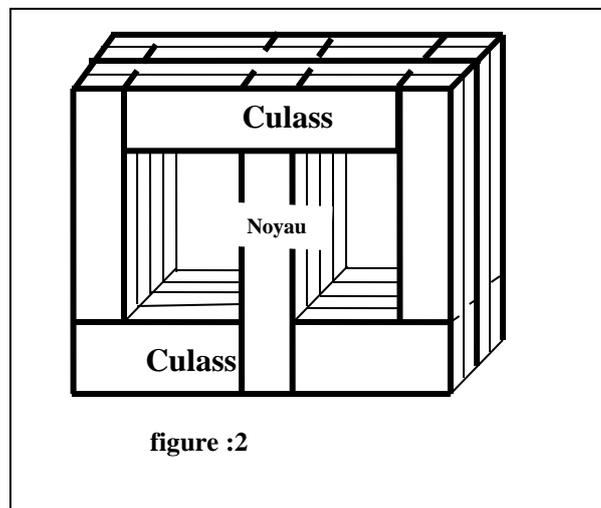
#### b) Ensemble de trois transformateurs monophasés identiques :

On connecte un transformateur monophasé sur chacune des phases. Cette solution est parfois utilisée en T.H.T dans le domaine des puissances élevées (figure :1).

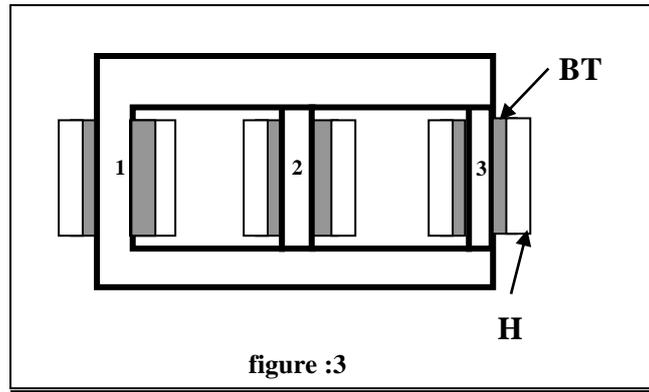


#### b) Transformateur triphasé :

Le plus souvent on utilise un appareil unique dont la carcasse magnétique comporte  
 → trois noyaux (ou colonnes) ayant des axes parallèles et situés dans un même plan, réunis par deux culasses (ou traverses) : (figure :2)



Le plus souvent, chaque noyau est entouré par une phase du primaire et une phase du secondaire (figure : 3).



## II. Fonctionnement en régime équilibré :

Soit un transformateur triphasé ( à flux libres ou liés ) dont les enroulements présentent :

- Par phase,  $n_1$  spires au primaire et  $n_2$  spires au secondaire,
- des couplages quelconques (étoile ou triangle).

Appliquons respectivement aux bornes des phases du primaire les tensions équilibrées.

$$v_1 = v_1 \sqrt{2} \cos wt$$

$$v'_1 = v_1 \sqrt{2} \cos(wt - \frac{2\pi}{3})$$

$$v''_1 = v_1 \sqrt{2} \cos(wt - \frac{4\pi}{3})$$

### 2.1 Fonctionnement à vide :

a) Si on néglige les chutes de tension dans les trois phases primaires, les flux  $\Phi$ ,  $\Phi'$  et  $\Phi''$  dans les trois colonnes bobinées sont tels que :

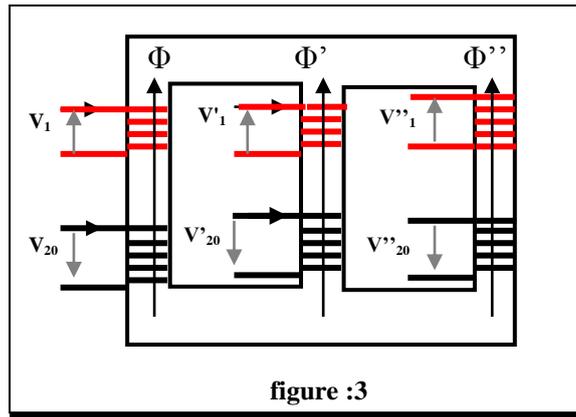
$$v_1 = n \frac{d\Phi}{dt} ; v'_1 = n \frac{d\Phi'}{dt} ; v''_1 = n \frac{d\Phi''}{dt}$$

Ces flux ont pour expressions :

$$\Phi = \frac{V_1}{m} \sqrt{2} \sin wt ;$$

$$\Phi' = \frac{V_1}{m\omega} \sqrt{2} \sin(wt - \frac{2\pi}{3})$$

$$\Phi'' = \frac{V_1}{m\omega} \sqrt{2} \sin(wt - \frac{4\pi}{3})$$



Ils sont sinusoïdaux et équilibrés si bien que leur somme est nulle : si l'appareil est à cinq noyaux, les flux dans les colonnes n'interviennent pas dans le fonctionnement équilibré.

**b)** Les flux  $\Phi$ ,  $\Phi'$  et  $\Phi''$  induisent dans les trois phases du secondaire des f.é.m sinusoïdales équilibrées ; pour le secondaire de la première colonne par exemple , on a

$$e_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

La tension correspondante (convention générateur) est :

$$V_{20} = e_2 = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\frac{V_{20}}{V_1} = \frac{n_2}{n_1} = -m$$

Les tensions à vide ,  $V_{20}$ ,  $V'_{20}$  et  $V''_{20}$  respectivement proportionnelles à  $V_1$ ,  $V'_1$  et  $V''_1$  sont sinusoïdales et équilibrées.

**2.2 Fonctionnement en charge :**

Fermons les trois phases du secondaire sur les trois phases identiques d'un récepteur triphasé( de facteur de puissance  $\cos \varphi_2$  ) ; appelons :

- $j_1, j'_1$  et  $j''_1$  les courants dans les trois phases du primaire,
- $j_2, j'_2$  et  $j''_2$  les courants dans les trois phases du secondaire.

**e) Résistances des enroulements et fuites magnétiques négligées.**

Les flux  $\Phi$ ,  $\Phi'$  et  $\Phi''$  restent les même que dans le fonctionnement à vide ainsi que les tension ( $v_2 = v_{20}$ ,  $v'_2 = v'_{20}$ ,  $v''_2 = v''_{20}$ ) : Les courants débités  $J_2, J'_2$  et  $J''_2$  son sinusoïdaux et équilibrés comme les trois tensions leur donnant naissance.

Sur la première colonne, la F.m.m. est la même qu'à vide (puisque le flux  $\Phi$  est le même) ; donc :  $n_1 j_1 + n_2 j_2 = n_{j_0} \implies j_1 = j_0 + (-m j_2)$

$J_0$  est le courant qui circule à vide dans la première phase du primaire

$J_0$  est très faible devant  $j_1$  on adopte alors l'approximation de Kapp en posant  $j_1 = -mj_2$

Il en est de même des deux autres colonnes.

La première colonne fonctionne comme un transformateur monophasé parfait de rapport  $m$

puisque  $\frac{V_{20}}{V_1} = -m$  et  $\frac{j_2}{j_1} = -\frac{1}{m}$  : (Figure :4)

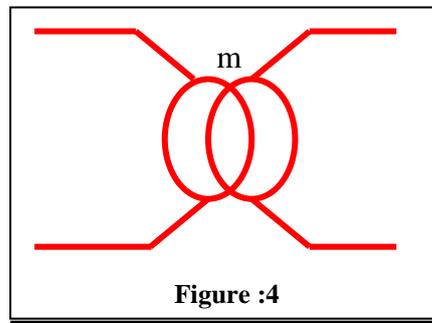


Figure :4

Il en est de même des deux autres colonnes.

**b) Résistances et fuites magnétiques prises en compte :**

Sur chaque colonne bobinée on retrouve la même topographie du champ que dans un transformateur monophasé, si bien que chacune des phases

- Du primaire présente l'inductance de fuites  $l_1$ ,
- Du secondaire présente l'inductance de fuites  $l_2$ ,

Pour chaque colonne, le modèle complet s'obtient donc à partir du transformateur monophasé parfait précédent en mettant en série

- Avec le primaire, l'impédance  $r_1 + j l_1 \omega$ .
- Avec le secondaire, l'impédance  $r_2 + j l_2 \omega$ .
- $r_1$  et  $r_2$  sont respectivement les résistances des phases du primaire et des phases du secondaire).

En transformant l'impédance  $r_1 + j l_1 \omega$  dans le secondaire du transformateur parfait on retrouve, pour chacune des colonnes, le même modèle de Kapp qu'en monophasé (sur la figure :5, on a porté les grandeurs correspondant à la première colonne).

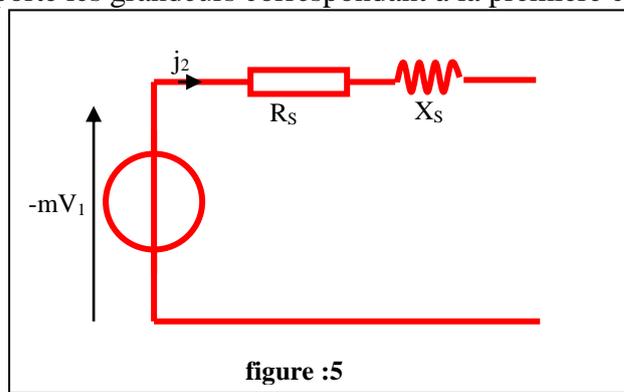


figure :5

En régime équilibré toute la théorie du transformateur monophasé est applicable à condition de raisonner « phase à phase », c'est-à-dire « une phase du primaire \_ la phase correspondante du secondaire » .

**2.3 Couplages du primaire et du secondaire :**

**a ) Couplage étoile : (figure :6)**

1/ Les courants  $i_1, i'_1$  et  $i''_1$  (valeur efficace  $I_1$ ) qui circulent dans les fils de phase de la ligne sont les mêmes que les courants  $j_1, j'_1$  et  $j''_1$  (valeur efficace  $j_1$ ) qui circulent dans les phases du transformateur .

$$I_1 = j_1$$

2/ Les tensions  $V_1, V'_1$  et  $V''_1$  (valeur efficace  $V_1$ ) constituent les tensions simples de la ligne (puisque le centre de l'étoile est au potentiel zéro) ; les tensions entre deux fils de phases de cette ligne ont pour valeur efficace  $U_1 = \sqrt{3} V_1$

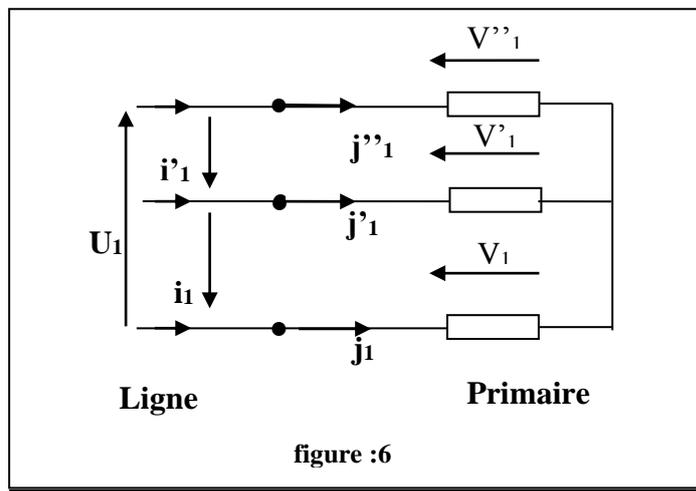


figure :6

**f) Couplage triangle : (figure :7)**

1/ Les courants  $i_1, i'_1$  et  $i''_1$  dans les fils de phases de la ligne ne sont plus les mêmes que les courants  $j_1, j'_1$  et  $j''_1$  dans les phases du transformateur ;

$$I_1 = J_1 \sqrt{3}$$

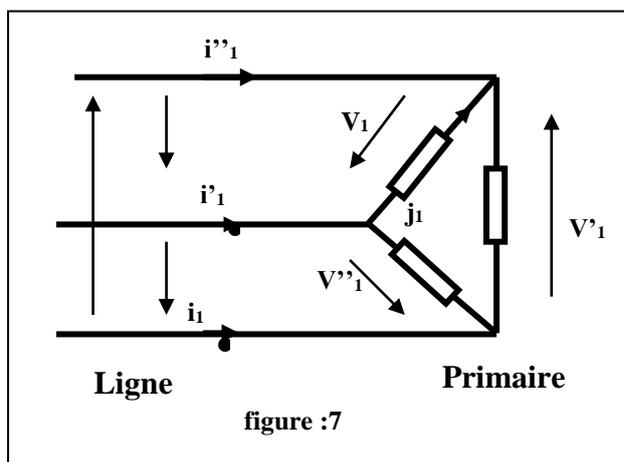


figure :7

2/ Les tensions  $V_1$ ,  $V'_1$  et  $V''_1$  aux bornes des phases de l'enroulement primaire ne sont plus les tensions simples de la ligne d'alimentation mais les tensions composées de cette ligne (autrement dit les tensions entre fils de phase pris deux à deux).

Les valeurs efficaces  $V_1$  et  $U_1$  sont donc égales

$$U_1 = V_1$$

**Les conclusions sont naturellement identiques en ce qui concerne les phases du secondaire et la ligne correspondante.**

**g) Conséquences :**

**1/ Rapport de transformation industriel  $m_i$  :**

Dans la théorie précédente nous avons considéré le rapport de transformation phase à phase.

$$m = \frac{n_2}{n_1} = \frac{V_{20}}{V_1}$$

Dans l'industrie on utilise surtout le rapport de transformation faisant intervenir

- La tension  $U_{20}$  entre deux fils de phase de la ligne secondaire ( dans le fonctionnement à vide ) .
- La tension  $U_1$  entre deux fils de phase de la ligne primaire.

$$m_i = \frac{U_{20}}{U_1}$$

Ce rapport  $m_i$  prend , en fonction de  $m$  ; des valeurs différentes selon les couplages du primaire et du secondaire.

Couplage	$U_{20}$	$U_1$	$m_i$
Y_Y	$V_{20}\sqrt{3}$	$V_1\sqrt{3}$	$m$
D_D	$V_{20}$	$V_1$	$m$
Y_D	$V_{20}$	$V_1\sqrt{3}$	$\frac{m}{\sqrt{3}}$
D_Y	$V_{20}\sqrt{3}$	$V_1$	$m\sqrt{3}$

D'autre part il est facile de vérifier que, quels que soient les couplages du primaire et du secondaire, on a :

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{m_i}$$

L'avantage du rapport  $m_i$  est qu'il ne fait intervenir que des grandeurs ( tension et courants ) directement mesurables quel que soit le couplage du transformateur, par exemple les tensions  $U_{20}$  et  $U_1$  telle que  $m_i = U_{20} / U_1$  ) sont accessibles dans l'essai à vide, même si le neutre n'est pas sorti :

## 2/ Intérêt du couplage étoile :

Si  $U_1$  la tension entre deux fils de phases de la ligne d'alimentation du primaire ( par exemple  $U_1=20kV$ ), la tension aux bornes de chaque phase du primaire est :

- $U_1$  avec le couplage triangle
- $\frac{U_1}{\sqrt{3}}$  avec le couplage étoile.

La tension que doit supporter chaque phase est plus faible avec le couplage étoile , si bien que l'isolement des bobinages est plus facile à réaliser .

**Le couplage étoile est plus économique que le couplage triangle, spécialement en H.T.**

D'autre part, au secondaire, le couplage étoile permet de sortir le neutre : cette propriété est, par exemple, indispensable pour les transformateurs de distribution alimentant des lignes à quatre fils en 220V et 380v.

## h) Valeurs nominales :

Elles se définissent phase à phase comme en monophasé :

$$V_{2n} = mV_{1n} ; J_m = mJ_{2n}$$

$$S_n = \sqrt{3}U_{1n}I_{1n} = \sqrt{3}U_{2n}I_{2n}$$

Comme en monophasé

- $U_2$  prend à vide , sa valeur nominale ( $U_{20} = U_{2n}$  ) si  $U_1 = U_{1n}$ .
- $I_1$  prend sa valeur nominale ( $I_1 = I_{1n}$ ) lorsque  $I_2 = I_{2n}$

## 2.4. Etude expérimentale et prédétermination du fonctionnement en charge :

a) En triphasé , les essais se conduisent comme en monophasé .Cependant les puissances à vide  $P_0$  ,en court\_ circuit  $P_{1cc}$  et en charge  $P_0$  étant généralement mesurées par la méthodes des deux wattmètres, sont des puissances globales( c'est à dire intéressant les trois phases de l'appareil)

b) Les prédéterminations du fonctionnement en charge se font de la même manière qu'en monophasé :

### 3) L'essai à vide :

fournit les pertes magnétiques dans les tôles ( $P_{\text{mag}} = P_o$ ) ainsi que le rapport :

$$m_i = \frac{U_{20}}{U_1}$$

et par suite le rapport de transformation phase à phase  $m$  ; (les couplages des enroulements étant connus).

### 2/ l'essai en court-circuit :

- Fournit les pertes par effet Joule pour le courant secondaire nominal ( $P_{1n} = P_{1cc}$ )
- Permet de calculer l'impédance  $Z_s = R_s + jX_s$  Ramené dans chaque phase du secondaire .

$$R_s = \frac{P_{cc}}{3J_{2n}^2} ; \quad X_s = \sqrt{\left(\frac{mV_{1cc}}{J_{2n}}\right)^2 - R_s^2}$$

### i) Chute de tension et rendement :

1/ la chute de tension aux bornes de chaque phase du secondaire

$\Delta U_2 = (R_s \cos \varphi_2 + X_s \sin \varphi_2) J_2$  et part suite la chute de tension entre deux fils de phases de la ligne secondaire ;

- secondaire en étoile :  $U_2 = V_2 \sqrt{3}$  et  $I_2 = J_2$

$$\Delta U_2 = \sqrt{3} (R_s \cos \varphi_2 + X_s \sin \varphi_2) I_2$$

- secondaire en triangle :  $U_2 = V_2$  et  $I_2 = J_2 \sqrt{3}$

$$\Delta U_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} (R_s \cos \varphi_2 + X_s \sin \varphi_2) I_2$$

2/ Le rendement du transformateur :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{mag}} + P_j}$$

$P_j$  étant proportionnel à  $j_2^2$  ( $P_j = 3R_s j_2^2$ ), est aussi proportionnel à  $I_2$  quelque soit le couplage ; comme  $P_j = P_{cc}$  lorsque  $I_2 = I_{2n}$ , on a

$$P_j = P_{cc} \left( \frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2$$

quelque soit le couplage, il vient donc

$$\eta = \frac{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi_2}{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos\varphi_2 + P_0 + P_{cc} \left( \frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2}$$

**Remarques :**

1/ Lorsque  $R_s$  et  $X_s$  sont exprimés en pourcentages c'est par rapport aux grandeurs phases (courant et tension) du secondaire, par exemple

$$r\% = \frac{R_s}{V_{2n} / J_{2n}} 100$$

Si le secondaire est en étoile, on peut écrire :

$$V_{2n} = \frac{U_{2n}}{\sqrt{3}} \text{ et } J_{2n} = I_{2n}$$

d'où

$$r\% = \frac{R_s}{U_{2n} / (I_{2n} \sqrt{3})} 100$$

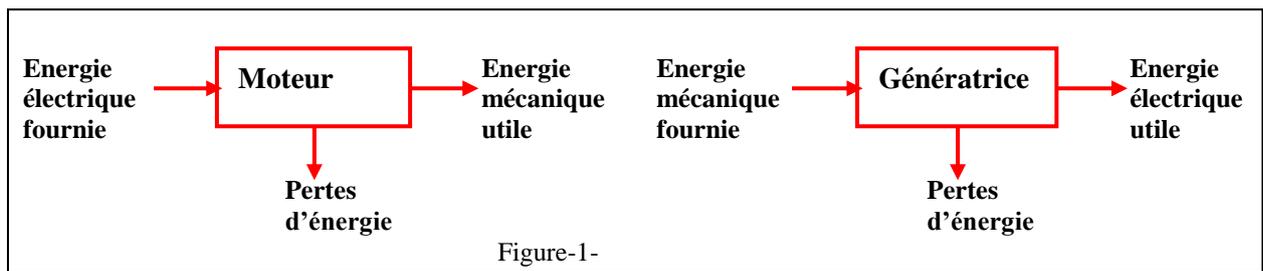
## Machines à courant continu

### I- Présentation générale :

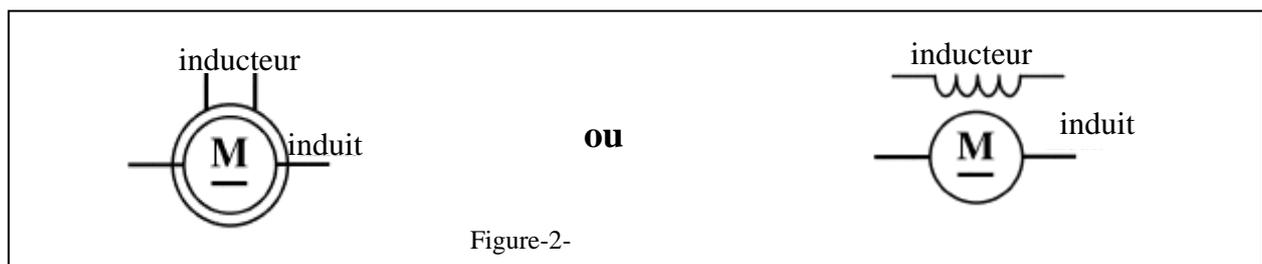
Une machine à courant continu est un convertisseur d'énergie réversible : (figure :1)

La génératrice transforme en énergie électrique une partie de l'énergie mécanique qu'elle reçoit, alors que le moteur effectue la transformation inverse ; ces transformations s'accompagne inévitablement de pertes, dont le bilan sera étudié ultérieurement.

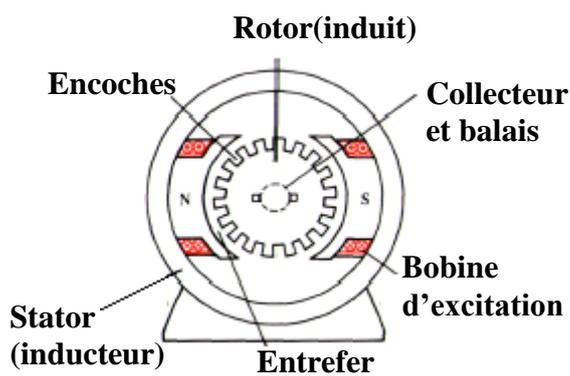
#### I.1 Conversion d'énergie



#### I.2 Symbole :(figure :2)



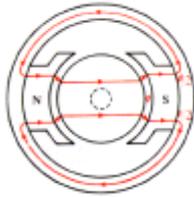
#### I.3 Constitution :(figure :3)



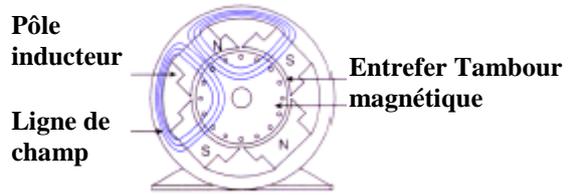
Le moteur comprend :

- Un circuit magnétique comportant une partie fixe ,le stator , une partie tournante , le rotor et l'entrefer l'espace entre les deux parties .
- Une source de champ magnétique nommée l'inducteur ( le stator ) crée par un bobinage ou des aimants permanents.
- Un circuit électrique induit ( le rotor ) subit les effets de ce champ magnétiques .
- Le collecteur et les balais permettent d'accéder au circuit électrique rotorique.

La machine électrique peut être bipolaire ou multipolaire (figure :4)



Circuit magnétique d'un moteur bipolaire



Circuit magnétique d'un moteur tétra-polaire

Figure-4-

**I.4 Force électromotrice :**

Nous savons qu'une bobine en mouvement dans un champs magnétique fait apparaître à ses bornes une force électromotrice (f.é.m.) donnée par la loi de Faraday:

Sur ce principe, la machine à courant continu est le siège d'une f.é.m. E :

$$E = \frac{P}{2\pi a} N\Phi \Omega$$

avec:

**p** : le nombre de paires de pôles

**a** : le nombre de paires de voies d'enroulement

**N** : le nombre de conducteurs (ou de brins - deux par spires)

**Φ** : flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)

**Ω** : vitesse de rotation (en rad.s<sup>-1</sup>)

**Finalement:**

$$E = K\Phi \Omega \quad \text{avec} \quad K = \frac{P}{2\pi a} N$$

Si de plus la machine fonctionne à flux constants :

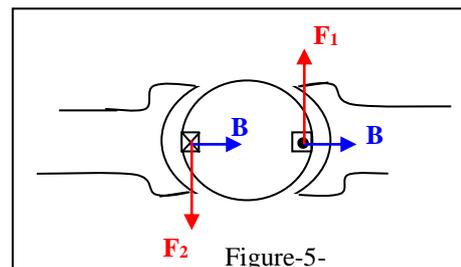
$$E = K' \Omega \quad \text{avec} \quad K' = K\Phi$$

**I.5 Couple électromagnétique :**

**Exemple pour une spire** : les deux brins d'une spire placés dans le champ magnétique B, subissent des forces de Laplace F<sub>1</sub> et F<sub>2</sub> ; (figure :5).

Et formant un couple de force(  $\vec{F}_1 = -\vec{F}_2 = \vec{T} \wedge \vec{B}$  )

Pour une spire  $T = 2rF = 2rlBI = SBI = \Phi I$



**Couple électromagnétique:**

$T_{em} = K \Phi I$  en Newtons. mètres (N.m)

$K$  est la même constante que dans la formule de la f.é.m.:  $E = K \Phi \Omega$

Si de plus la machine fonctionne à flux constant :  $T_{em} = K' I$  avec  $K' = K \Phi$

**I.6 Puissance électromagnétique :**

Si l'induit présente une f.é.m.  $E$  et s'il est parcouru par le courant  $I$ , il reçoit une puissance électromagnétique  $P_{em} = E.I$

D'après le principe de conservation de l'énergie cette puissance est égale à la puissance développée par le couple électromagnétique.

$$P_{em} = T_{em} \Omega = EI$$

**Remarque :** on retrouve la relation  $T_{em} = K \Phi I$

En effet  $E = K \Phi \Omega$  donc  $EI = K \Phi \Omega I = T_{em} \Omega$  d'où  $T_{em} = K \Phi I$

**I.7 Réversibilité :**

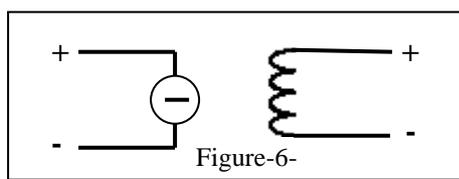
A flux  $\Phi$  constant,  $E$  ne dépend que de  $\Omega$  et  $I$  ne dépend que de  $T_{em}$ .

La f.é.m. de la machine et l'intensité du courant dans l'induit sont deux grandeurs indépendantes. On peut donc donner le signe souhaité au produit  $E.I$ .

La machine peut donc indifféremment fonctionner en moteur ( $P_{em} > 0$ ) ou en génératrice ( $P_{em} < 0$ ).

**I.8 Caractéristiques :**

Conditions expérimentales : (figure :6)



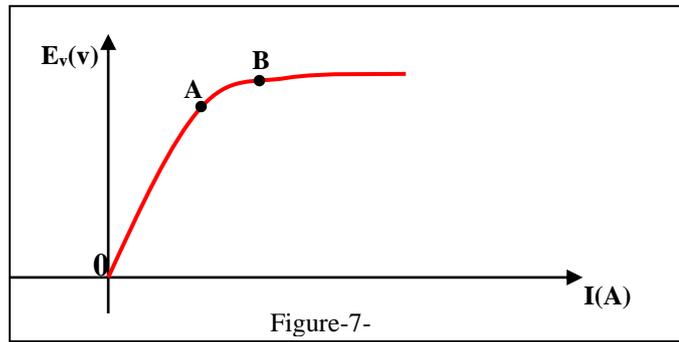
Une source continue extérieure fournit à l'inducteur le courant d'excitation  $j$  :

La machine est utilisée en excitation indépendante .L'induit tourne à la vitesse  $\Omega$  et n'est pas traversé par aucun courant ( la machine fonctionne à vide ).

**I.8.1 Caractéristique à vide  $E_v=f(\Phi)$  à  $\Phi$  constante :**

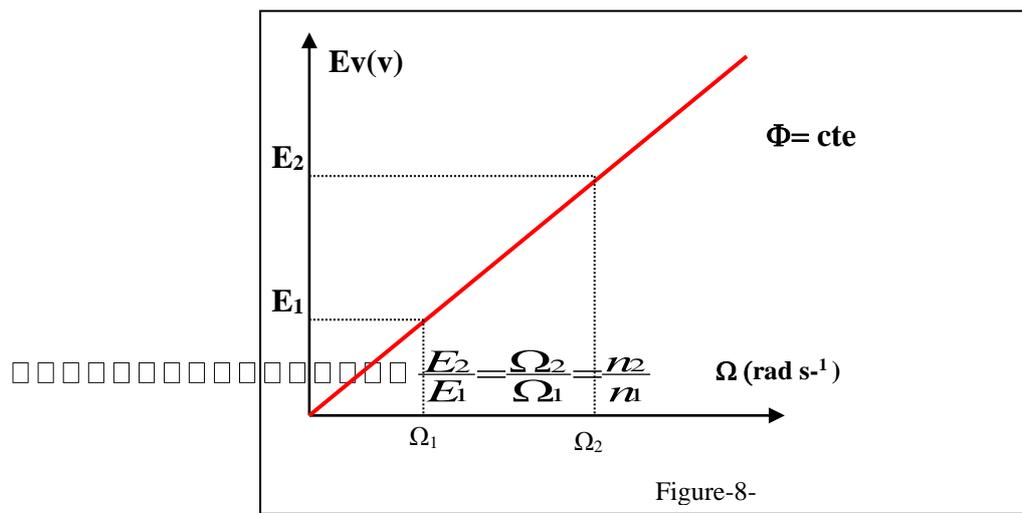
Elle donne les variations de la f.é.m  $E = K\Phi\Omega$  en fonction de celle du courant inducteur  $j$  :  
 (Figure :7)

- De O à A, la caractéristique est linéaire,  $E=K'\Phi$  (avec  $K'=K\Omega$ ).
- De A à B le matériau ferromagnétique dont est constitué le moteur commence à saturer. ( $\mu_r$  n'est plus constant).
- Après B, le matériau est saturé, le f.é.m. n'augmente plus.
- La zone utile de fonctionnement de la machine se situe au voisinage du point A.



Sous le point A, la machine est sous utilisée, et après le point B l'augmentation du courant  $j$  ne se manifeste plus par un croisement du flux en raison de la saturation, mais les pertes joules inducteur augmentent puisque  $j$  augmente .

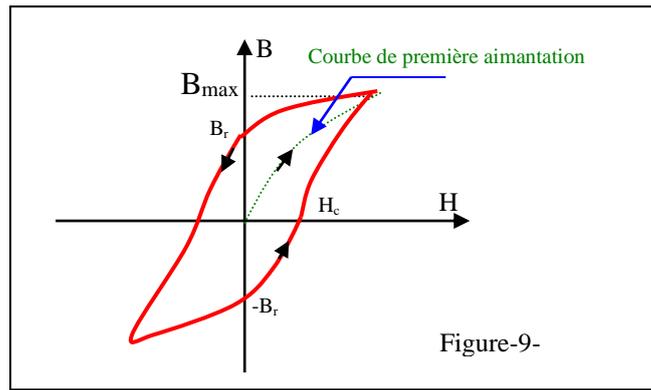
**I.8.2 Caractéristique  $E_v =f(\Omega)$  à  $\Phi$  constant :**



**Remarque :** la caractéristique est linéaire tant que la saturation n'est pas atteinte ; (Figure :8)

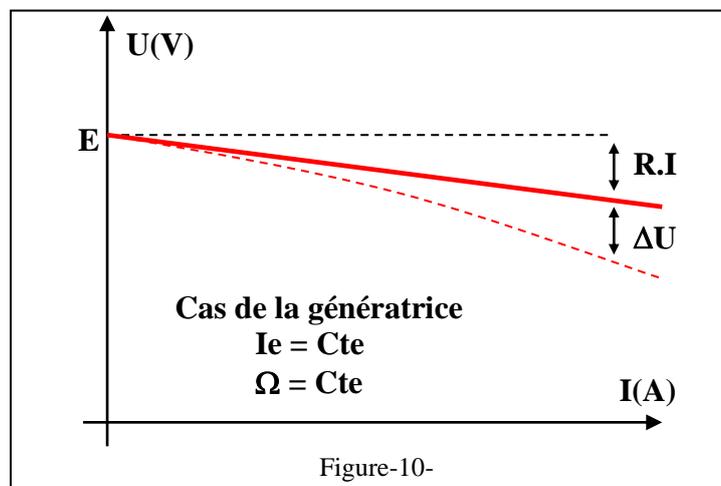
**I.8.3 Phénomène d’hystérésis :**

A partir d’un point (H,B) de la courbe de la première aimantation on diminue le champ H, L’induction B ne repasse pas sur la même courbe. En conséquence, B nulle ne correspond plus à une valeur nulle de H. Il subsiste une induction rémanente  $B_r$  (induction qui demeure après la disparition du champ).Le champ d’excitation doit s’inverser pour annuler B , c’est le champ coercitif  $H_c$  (le champ à appliquer pour annuler l’induction).l’induction maximal est l’induction de saturation  $B_{max}$  : (Figure :9)



**I.8.4 Caractéristique en charge  $U = f(I)$  : (Figure :10)**

- La résistance du bobinage provoque une légère **chute de tension ohmique** dans l’induit :  $\Delta U=R.I$
- Le courant qui circule dans l’induit crée un flux indésirable de sorte que le flux total en charge  $\Phi_{Charge}(j,i) < \Phi_{vide}(j)$ . Cela se traduit par une chute de tension supplémentaire : c’est la **réaction magnétique d’induit.**



**Pour une génératrice  $U = E - R I - \Delta U$**

**Pour un moteur  $E = U - R I - \Delta U$**

Pour l'annuler, la machine possède sur le stator des enroulements de compensation parcourus par le courant d'induit : on dit que **la machine est compensée**. C'est souvent le cas.

- La distribution du courant d'induit par les balais et le collecteur provoque également une légère chute de tension (souvent négligée).

### 1.8.5 Modèle équivalent de l'induit :

Des caractéristiques précédentes on déduit un schéma équivalent de l'induit : (Figure :11)

**E** : f.é.m.

**R** : résistance du bobinage

**I** : courant d'induit

**U** : tension aux bornes de connexion de l'induit.

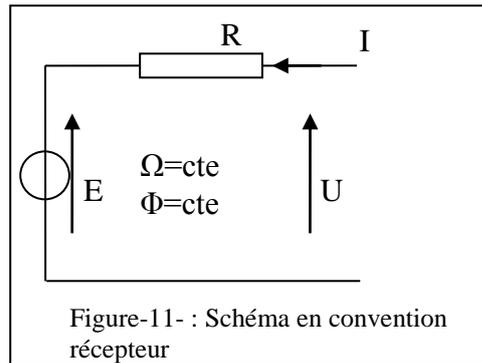


Figure-11- : Schéma en convention récepteur

D'après la loi d'Ohms :  $U = E + RI$  Schéma en convention récepteur.

## Moteur à courant continu sous tension constante

Nous proposons dans ce chapitre d'étudier les deux modes de fonctionnement de la machine à courant continu en moteur .

- En excitation indépendante (ou séparée ) : l'enroulement inducteur est alimenté par une source auxiliaire
- En excitation série : l'enroulement inducteur en série avec l'induit , est donc parcouru par le même courant que lui.

### I – Caractéristiques du moteur en excitation séparée :

Le courant d'excitation  $j$  est maintenu constant (Le moteur est à flux constant), le moteur étant supposé bien compensé, le flux utile  $\Phi$  reste invariable quelque soit le courant  $I$  dans l'induit , c'est à dire quelque soit le couple résistant  $Tr$  exercé sur l'arbre ..

Nous allons successivement considérer les trois caractéristiques suivantes, correspondant à la valeur nominale de la tension  $U$  :

- Caractéristique de vitesse  $n = f(I)$ .
- Caractéristique de couple  $Tu = f(I)$  .
- Caractéristique mécanique  $Tu = f(n)$ .

#### I.1- Montage expérimental

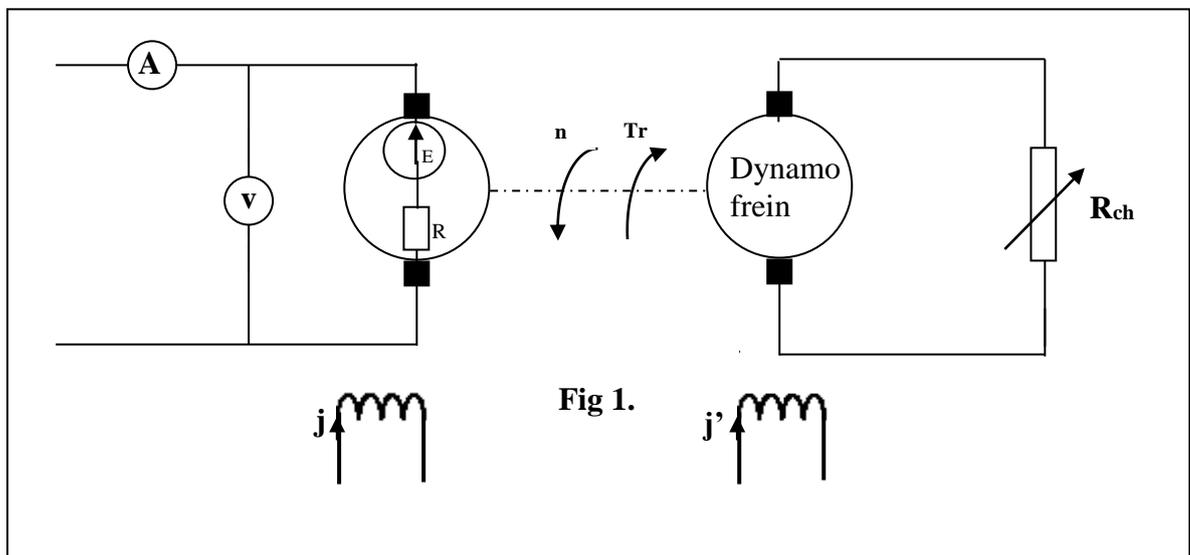
a/ Nous utiliserons le montage de la figure 1 :

La dynamo frein est menu d'un couple – mètre et un tachymètre affiche la fréquence de rotation.

Le moteur pris comme exemple a pour caractéristiques :

$Un = 120v$ ,  $In = 50A$ ,  $Pn = 50KW$ ,  $nn = 1500tr/mn$

D'autre part la résistance totale de l'induit est  $R = 0.14\Omega$ .



## b/ Nécessité d'un rhéostat de démarrage

La loi d'HOM appliquée à l'induit  $U = E + RI$  donne l'expression du courant  $I = \frac{U - E}{R}$ . Au début de démarrage, lorsque l'induit vient d'être mis sous tension et que le rotor n'a pas encore commencé à tourner ( $n=0$ )

- La f.é.m  $E = K \Phi \Omega$  est nulle.
- Le courant absorbé prend la valeur  $I_d = U/R$ . ( $I_d$  est le courant de démarrage).

La résistance  $R$  étant aussi faible que possible pour que les pertes par effet joule en marche normale reste petite devant la puissance utile, le courant  $I_d$  est généralement très supérieur au courant nominal  $I_n$ .

Exemple :

$$I_d = 120/0.14 = 857A \gg I_n = 50A !$$

Ce courant, même s'il est bref, est le plus souvent inadmissible pour le moteur.

Dans le cas où le moteur est alimenté sous tension constante, il est indispensable d'insérer au moment du démarrage, un rhéostat dit rhéostat de démarrage si  $R_d$  est sa valeur maximale, le courant au moment de la mise sous tension a pour expression  $I_d = \frac{U}{R + R_d}$

Le rapport  $I_d/I_n$  est la pointe de courant.

Exemple : Si le moteur accepte une pointe de courant égal à 2,  $R_d$  doit être tel que ;

$$I_d = \frac{U}{R + R_d} = 2I_n \rightarrow I_d = 100A.$$

$$R_d = \frac{U}{I_d} - R \rightarrow R_d = (120/100) - 0.14 = 1.1\Omega.$$

Le rhéostat de démarrage est souvent à plots, est éliminé progressivement au fur et à mesure que la vitesse augmente.

## I.2- caractéristiques de vitesse :

a/ **Fonctionnement à vide** : ( la dynamo frein est découplée du moteur )

Si le moteur était idéal, c'est à dire sans pertes, le courant induit serait nul. En effet, l'existence des pertes mécaniques et des pertes magnétiques dans les tôles de l'induit fait appel à un courant  $I_0$  très faible devant  $I_n$  telle que :

$$UI_0 = P_{mec} + P_{mag} + RI_0^2 \approx P_{mec} + P_{mag}.$$

$$\Omega(I_0) = \frac{U - RI_0}{K\Phi} = \Omega_0$$

**Exemple :** avec  $j= 1.5A$  et sous  $U = 120 v$   $n_0 = 1500tr/mn$  et  $I_0 =4A$

$$RI_0 = 0.14 \cdot 4 = 0.56v \ll U = 120v \text{ et } n(I_0) \approx n_0 = 1500tr/mn$$

$$RI_0^2 = 0.14 \cdot 4^2 = 2.24W \ll U I_0 = 120 \cdot 4 = 480W.$$

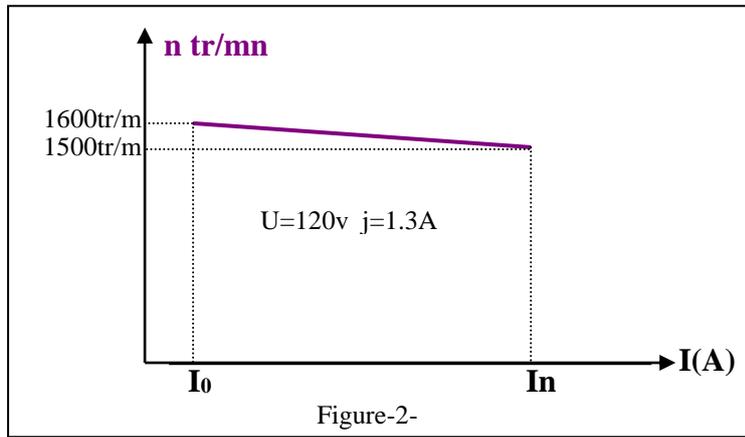
$$P_{mec} + P_{mag} \approx 480W$$

**b) Fonctionnement en charge :**

On accouple au moteur la dynamo frein : on effectue le démarrage du moteur à vide puis on excite la dynamo (excitation séparée ) et on ferme son induit sur le rhéostat  $R_h$  dont on diminue progressivement la valeur .

On constate expérimentalement que : **(Figure :2)**

- Le courant  $I$  dans le moteur augmente
- La fréquence de rotation  $n$  diminue bien que la valeur reste toujours voisines de  $n_0$ .
- Le graphe obtenu est le suivant :



$$\Omega(I_0) = \frac{U - RI}{K\Phi} = \frac{U}{K} - \frac{R}{K} I$$

$\Omega=f(I)$  est une fonction affine de pente négative de valeur  $\frac{R}{K}$ .

**a/ Sens de rotation :**

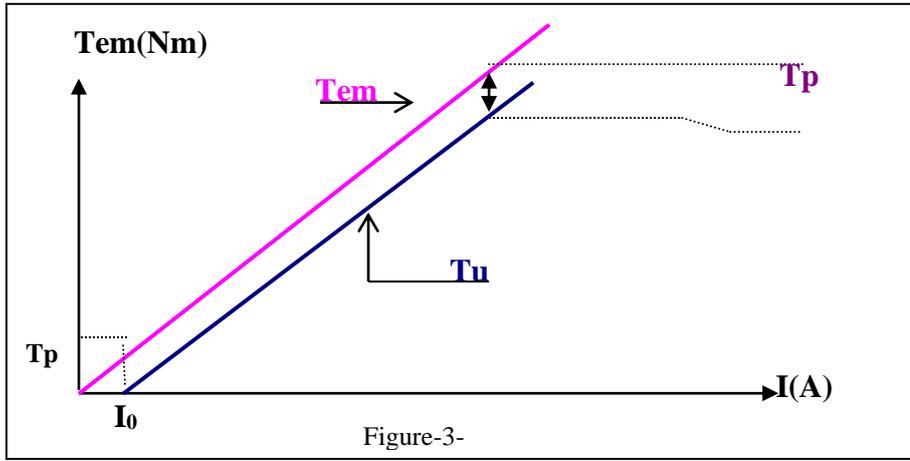
Pour inverser le couple électromagnétique , c'est à dire le sens des forces de LAPLACE s'exercent sur les conducteurs rotoriques , il suffit d'inverser :

- Soit le courant dans l'induit ( inversant la tension appliquée  $U$  ).
- Soit le champ magnétique( inversant le courant  $j$ ).

**I.3- Caractéristiques du couple :  $T_u$  f(I) (Figure :3)**

$$\text{On a } T_u = T_{em} - T_p \text{ avec } T_p = \frac{P_{mec} + P_{mag}}{\Omega}$$

Les pertes magnétiques et mécaniques sont sensiblement proportionnelles à  $n$ . Il en résulte que  $T_p$  est sensiblement constant lorsque la charge du moteur varie.



La caractéristique  $T_u = f(I)$  se déduit de la caractéristique  $T_{em} = f(I)$  par une translation verticale, vers le bas d'une quantité égal à  $T_p$

**I.4- Caractéristique mécanique  $T_u = f(n)$  : (Figure :4)**

Nous savons que lorsque le couple résistant  $T_r$  augmente, la fréquence de rotation diminue faiblement à partir de  $n_0$  comme  $T_u = T_r$  en régime permanent, la caractéristique mécanique est presque verticale

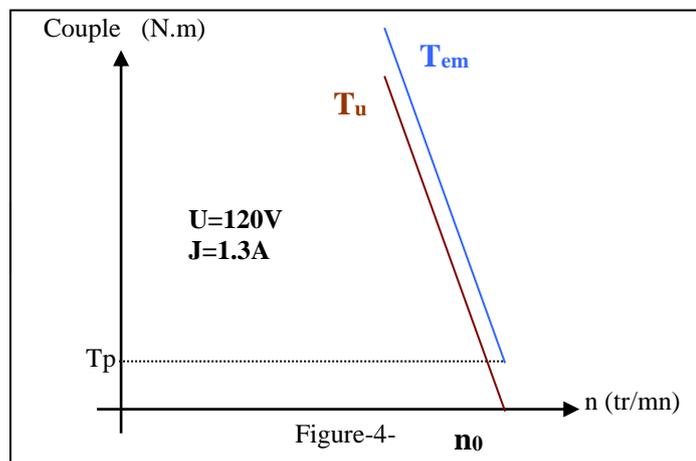
**On a :**

\*  $T_{em} = K' I$  (à flux constant)

\*  $I = \frac{U - E}{R} \Rightarrow \frac{T_{em}}{K'} = \frac{1}{R}(U - E) \Rightarrow T_{em} = \frac{K'}{R} \cdot U - \frac{K'^2}{R} \Omega.$

D'où  $T_{em} = \frac{K'}{R} \cdot U - \frac{K'^2}{R} \Omega$  pour  $\Omega = \Omega_0 \Rightarrow T_{em} = T_p \Rightarrow T_u = 0.$

Lorsque  $T_{em}$  augmente  $n$  diminue et  $T_u = T_{em} - T_p.$



### I.5 Point de fonctionnement :

Une charge oppose au moteur un couple résistant  $T_r$ . Pour que le moteur puisse entraîner cette charge, le moteur doit fournir un couple utile  $T_u$  de telle sorte que :

$$T_u = T_r$$

Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur. (Figure :5)

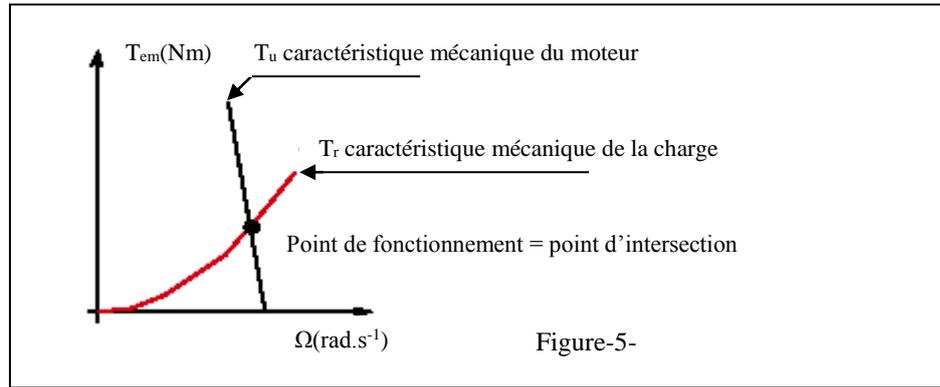


Figure-5-

### I.6 Bilan énergétique Soient :

- Pa:** La puissance absorbée (W) ;
- Ue:** La tension de l'inducteur (V) ;
- Je:** Le courant d'inducteur (A) ;
- P<sub>em</sub>:** La puissance électromagnétique (W) ;
- P<sub>u</sub>:** La puissance utile (W);
- P<sub>je</sub>:** Les pertes joules à l'inducteur (W);
- P<sub>j</sub>:** Les pertes joules à l'induit (W) ;
- P<sub>fer</sub>:** Les pertes ferromagnétiques (W) ;
- P<sub>méca</sub>:** Les pertes mécaniques (W) ;
- E :** La f.é.m. (V) ;
- I :** Le courant d'induit (A) ;
- T<sub>em</sub> :** Le couple électromagnétique (N.m) ;
- T<sub>u</sub> :** Le couple utile (N.m) ;
- Ω :** □□□□□ La vitesse de rotation (rad.s<sup>-1</sup>) ;
- R :** La résistance d'induit □(Ω) ;
- r :** La résistance d'inducteur (□Ω) ;

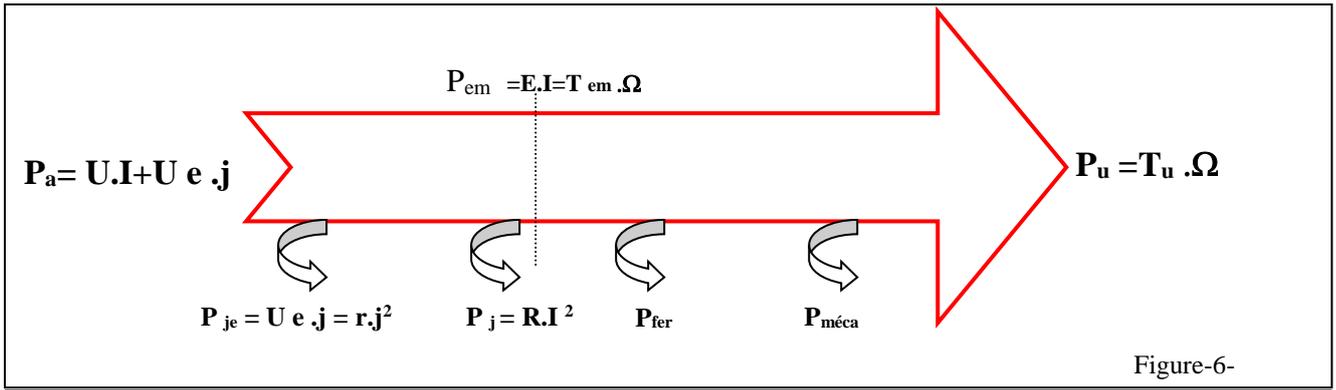


Figure-6-

**Exploitation du diagramme : (Figure :6)**

par exemple :  $P_{em} = P_a - P_{je} - P_j$  ;  $P_c = P_{em} - P_u$

**Remarques :**

- Toute l'énergie absorbée à l'inducteur et dissipée par effet joule.
- Les pertes fer et les pertes mécaniques sont rarement dissociées, la somme étant les pertes constantes  $P_c$ .
- Si le moteur est à aimants permanents,  $U_e, j$  et  $P_{je}$  n'existent pas.

**I.7 Couples :**

**Soient :**

- \*  $T_{em}$  :le couple électromagnétique (N.m) ;
- \*  $T_u$  :le couple utile en sortie d'arbre (N.m).

**Pertes constantes**

$$P_c = P_{em} - P_u$$

D'après le diagramme des puissances,  $P_c$  est la différence entre la puissance électromagnétique et la puissance utile.

En effet :  $P_c = P_{fer} + P_{méc}$

**Couple de pertes  $T_p$  :**

$$T_p = \frac{P_c}{\Omega} = \frac{P_{em} - P_u}{\Omega} = \frac{P_{em}}{\Omega} - \frac{P_u}{\Omega} = T_{em} - T_u$$

**I.8 Rendement :**

**I.8.1 Mesure directe**

Cette méthode consiste à mesurer  $P_a$  et  $P_u$ .

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{T_u \Omega}{UI + P_{je}}$$

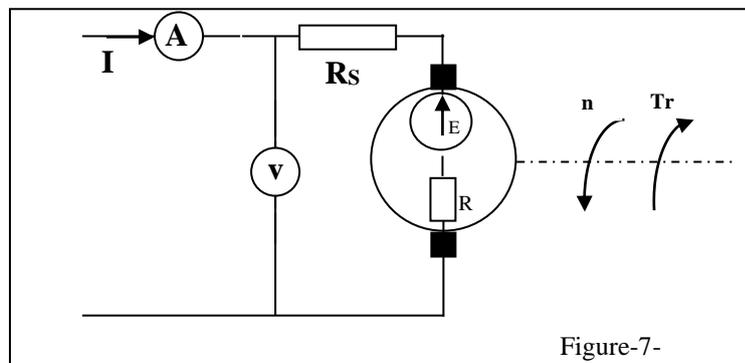
**I.8.2 Méthode des pertes séparées**

Cette méthode consiste à évaluer les différentes pertes.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \sum \text{pertes}}{P_a}$$

**II- Caractéristiques du moteur en excitation série :**

L'enroulement inducteur est en série avec l'enroulement d'induit : le courant d'excitation est donc le même que le courant  $I$  qui circule dans l'induit : (figure :7)



Lorsque le couple  $T_r$  exercé sur l'arbre par la charge varie, il en est de même du courant absorbé  $I$  et par la suite du flux  $\Phi$ .

➔ Le moteur série est à flux variable.

**II.1- Caractéristique de vitesse :  $n = f(I)$**

$$\Omega = \frac{U - (R + R_s)I}{K\Phi}$$

Ici le flux  $\Phi$  est en fonction du courant induit

- Supposant le circuit magnétique non saturable  $\Phi = K.I$ ,  $K = cte$ .

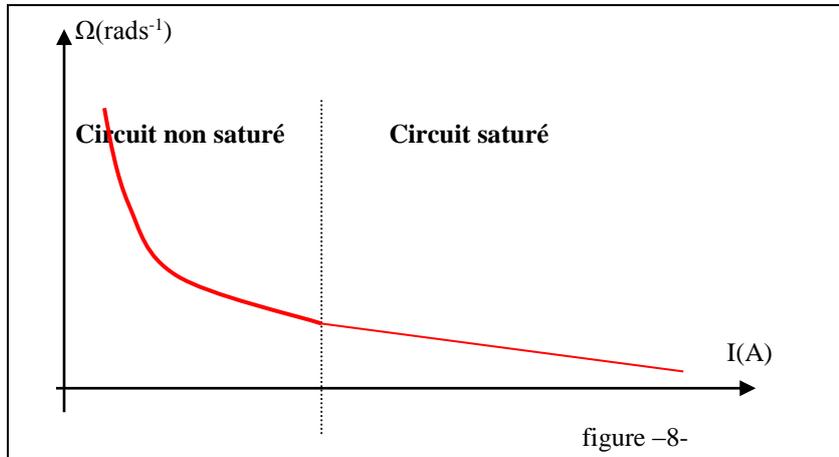
$$\Omega = \frac{U - (R + R_s)I}{K'I}$$

Son graphe est une branche d'hyperbole équilatère : (figure :8)

**Lorsque la charge augmente :**

Le circuit magnétique se sature et le flux  $\Phi = \text{cte}$  pour  $I \gg I_n$ .

Son graphe est presque une droite affine de pente négative : **(figure :8)**

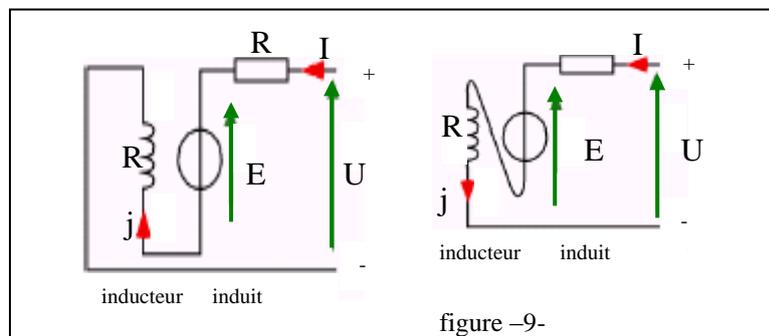


**b/ sens de rotation :**

Inversons la tension appliquée  $U$  au moteur ; le courant  $I$  se met à circuler en sens opposé si bien que :

- \* Le champ magnétique d'une part .
- \* Le courant dans l'enroulement robotiques d'autre part s'inversent tous les forces de LAPLACE qui s'exercent sur le rotor gardant le même sens autrement dit le couple électromagnétique précédemment .
- \* Si on désire inverser le sens de rotation d'un moteur série , il faut inverser le sens du courant :
  - \* soit dans l'inducteur .
  - \* soit dans l'induit .

Donc inverser les connexions entre ces deux enroulements. **(figure :9)**



**b/ Nécessité d'un rhéostat de démarrage :**

Comme pour le moteur en excitation indépendante, le courant appelé au moment de la mise

sous tension : 
$$I_d = \frac{U}{R + R_s}$$

Le courant de démarrage est très supérieur au courant nominal  $I_n$  (insupportable pour le moteur) . On insère donc une rhéostat de démarrage dont la valeur  $R_d$  est telle que le courant

$$I_d = \frac{U}{R + R_s + R_d} .$$

**II.2- Caractéristiques du couple  $T_u = f(I)$**

L'expression du couple  $T_{em}$  est encore  $T_{em} = K \cdot \Phi \cdot I$ .

Mais ici  $\Phi$  est en fonction de  $I$ .

\* Au faible charge on a  $\Phi = K_1 \cdot I$  donc  $T_{em} = K I^2$

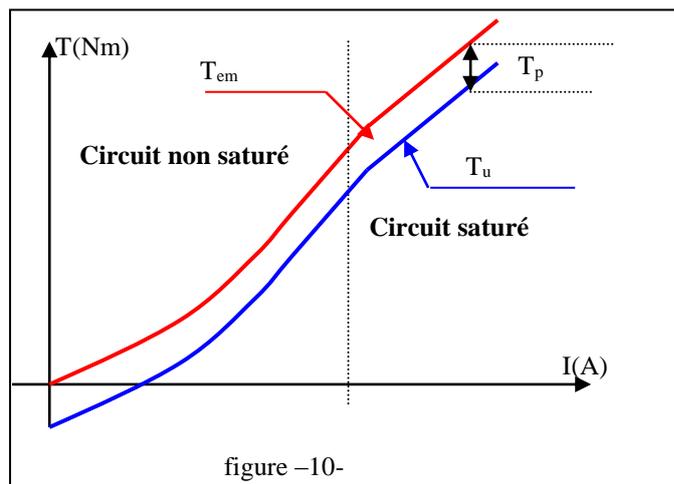
La caractéristique correspondante est une branche de parabole (**figure :10**)

Au fur et à mesure que la charge augmente le circuit magnétique du moteur se sature à partir d'une certaine charge, le flux croit alors moins vite que le produit  $KI$ .

On suppose que le flux  $\Phi$  reste constant pour des charges de valeur élevée ( pour un courant  $I \gg I_n$ )  $\rightarrow \Phi = Cte$ .

$$\rightarrow T_{em} = \frac{P}{2\pi\alpha} \cdot N \cdot \Phi \cdot I = K' \cdot I$$

La caractéristique correspondante est une branche d'une droite linéaire : (**figure :10**)



### II.3- caractéristique mécanique : $T_u = f(n)$

#### a/ fonctionnement à vide :

Lorsque  $T_r = 0$  :

→  $T_u = 0$  (en régime permanent).

→  $T_{em} = T_p$  faible.

→  $I = I_0$  courant faible.

$$\text{Or } \Omega = \frac{U - (R + R_s)I_0}{KI_0} \approx \frac{U}{KI_0}.$$

Si  $T_{em}$  tend vers 0,  $I$  tend aussi vers 0 et  $\Omega$  tend vers l'infini (si l'on ne tient pas compte des frottements).

Alimenté sous tension nominale, le moteur série ne doit jamais fonctionner à vide (risque de s'emballer).

→ La vitesse prend une valeur très élevée on dit que le moteur s'emballer.

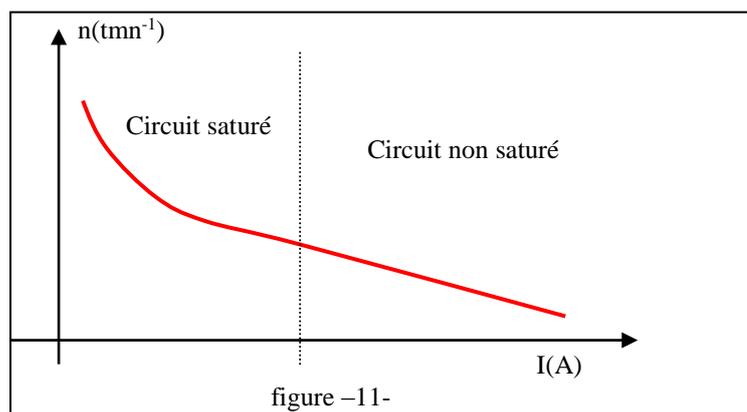
**Le moteur série s'emballer à vide.**

#### b/ fonctionnement en charge : (figure :11)

Lorsque le couple  $T_r$  augmente :

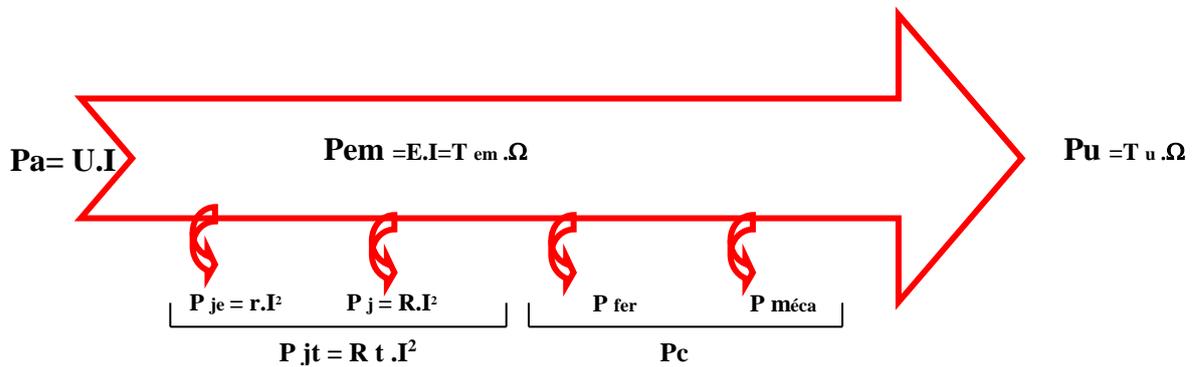
\* Le courant  $I$  appelé croît.

\* La fréquence de rotation  $n$  décroît



$T_u$  diminue lorsque  $n$  augmente le couple utile est sensiblement inversement proportionnel à la fréquence de rotation  $n$  →  $T_u = K/n$  avec  $K = C^{te}$ .

### II.4 Bilan énergétique :



### III- Moteur universel :

On constate donc que le courant dans un moteur à excitation série peut-être inversé sans que le sens de rotation le soit.

Le moteur peut donc fonctionner en courant alternatif.

Pour optimiser son fonctionnement en courant alternatif il subit quelques modifications.

On l'appelle le **moteur universel**.

### IV- Emploi et identification :

#### IV.1 Moteur à excitation indépendante :

Ce moteur est caractérisé par une vitesse réglable par tension et indépendante de la charge.

En association avec un convertisseur statique (hacheur) fournissant une tension réglable, la vitesse peut varier sur un large domaine.

Il fournit un couple important à faible vitesse (machines-outils, levage).

En petite puissance, il est souvent utilisé en asservissement avec une régulation de vitesse.

#### IV.2 Moteur à excitation en série :

Ce moteur possède un fort couple de démarrage. Il convient très bien dans le domaine des fortes puissances (1 à 10 MW) pour obtenir un fonctionnement satisfaisant en faible vitesse (traction, laminoirs).

En petite puissance il est employé comme démarreur des moteurs à explosion.

#### IV.3 Remarque :

Vue la difficultés de réalisation et son coût d'entretien le moteur à courant continu tend à disparaître dans le domaine des fortes puissances pour être remplacé par le moteur synchrone Auto-piloté (ou moteur auto-synchrone).

# EXERCICES

## Transformateurs Monophasés

### EXERCICE 1 :

On veut faire les essais d'un transformateur monophasé dont la plaque signalétique porte les indications suivantes :  $S_n = 500 \text{ VA}$  ;  $U_{1n} = 220 \text{ V}$  ;  $U_{2v} = 48\text{V}$ .

On dispose des appareils de mesure suivants :

Wattmètre : calibre I :100, 300mA ; calibres U :10, 30, 100 et 300 V.

Voltmètre :calibre I :2.5, 5 A ; calibres U :10, 30, 100 et 300V ;

Voltmètres AD/AC ; multicalibres 3, 10, 30 ,100 et 300V ;

Ampermètres AD/AC : multicalibres 10, 30, 100 , 300mA ; 1, 3, 10 et 30A.

1. Calculer les intensités nominales  $I_{1n}$  et  $I_{2n}$  du transformateur.

- Essai à vide à  $U_1=U_{1n}$ .
  - a) Donner un ordre de grandeur de l'intensité du courant primaire à vide  $I_{10}$ .
  - b) Indiquer les grandeurs recherchées au cours de cet essai .
  - c) Etablir le schéma de principe du câblage et indiquer le calibre des appareils utilisés.
- Essai en cours- circuit à  $I_{2cc}=I_{2n}$ .
  - a) Donner un ordre de grandeur de la tension primaire  $U_{1cc}$  pour cet essai.
  - b) Indiquer les grandeurs recherchées au cours de cet essai.
  - c) Etablir le schéma de principe du câblage et indiquer le calibre des appareils utilisés .

### EXERCICE 2 :

Les essais d'un transformateur monophasé donné les résultats suivants :

- Essai à vide sous tension primaire nominale :
 

$U_{1n} = 2.20 \text{ KV}$  ;  $f= 50\text{Hz}$  ;

Valeur efficace de l'intensité du courant mesuré au primaire :  $I_{1v} = 1.5\text{A}$ ;

Valeur efficace de la tension mesurée au secondaire :  $U_{2v}= 230 \text{ V}$

Puissance active mesurée au primaire :  $P_{1v}= 700\text{W}$
- Essai en court-circuit sous tension primaire réduite :  $U_{1cc} = 130\text{V}$ 

Valeur efficace de l'intensité du courant secondaire :  $I_{2cc}=200\text{A}$

Puissance active mesurée au primaire :  $P_{1cc} = 1.5\text{Kw}$

1/ Proposer un schéma de câblage du transformateur lors de l'essai à vide, avec tous appareil permettant de mesurer  $I_{1v}$ ,  $U_{2v}$ ,  $P_{1v}$  en indiquant e type d'appareil choisi.

2/ Calculer le rapport de transformation m.

3/ calculer le facteur de puissance du transformateur lors de l'essai à vide.

4/ On note  $I_{1m}$  la valeur efficace de la composante réactive de l'intensité  $I_{1v}$ .

Calculer  $I_{1m}$  (appelé parfois courant magnétisant).

5/ On appelle  $R_s$  la résistance des enroulements ramenée au secondaire et  $X_s$  la réactance ramenée au secondaire.

- Proposer un schéma de câblage du transformateur lors de l'essai en court –circuit , avec tous les appareils permettant de mesurer  $U_{1cc}$ ,  $I_{1cc}$ ,  $P_{1cc}$ .
- Pourquoi cet essai est il réalisée sous tension primaire réduite ?
- Faire un schéma électrique équivalent du transformateur ramené au secondaire pour cet essai ; y porter toute les grandeurs électriques
- Que représente la puissance active  $P_{1cc}$  lors de cet essai ?
- Calculer  $R_s$ .
- Calculer le module de l'impédance  $Z_s$  ramenée au secondaire . Montrer que

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} . \text{ Calculer } X_s .$$

6/ Le secondaire alimente maintenant une charge inductive de facteur de puissance 0.8.

$U_1 = U_{1n} = 2.2KV$ . On prélève  $I_{2n} = 200A$ .

- Faire un schéma électrique équivalent du montage , le transformateur étant représenté par son modèle équivalent ramené au secondaire.
- Calculer une valeur approchée de  $U_2$ .
- En déduire la puissance active fournie à la charge.
- Quelle est la valeur des pertes dans le fer  $P_f$  ?

Quelle est la valeur des pertes par effet Joule  $P_j$  ? Calculer la puissance active  $P_1$  absorbée au primaire.

- Calculer le rendement du transformateur.

### EXERCICE 3 :

Les essais d'un transformateur monophasé ont donné :

- A vide :  $U_1 = 220V, 50Hz$  (tension nominale primaire) ;  $U_2 = 44V$  ;  $P_{1v} = 80W$  ;  $I_{1v} = 1A$ .
- En continu au primaire :  $I_1 = 10A$  ;  $U_1 = 5V$ .

- En court-circuit :  $U_{lcc} = 40V$  ;  $P_{lcc} = 250W$  ;

$I_{lcc} = 20A$  ( courant nominale primaire) .Le transformateur est considéré comme parfait pour les courants lorsque ceux-ci ont leurs valeurs nominales.

I-1 ) Déterminer le rapport de transformation et le nombre de spires au secondaire , si l'on en compte 520 au primaire .

2) Vérifier que l'on peut négliger les pertes par effet Joule lors de l'essai à vide .En admettant que les pertes dans le fer sont proportionnelles au carré de la tension primaire montrer qu'elles sont négligeables dans l'essai en court-circuit.

1) Représenter le schéma équivalent du transformateur en court-circuit vu du secondaire .En déduire les valeurs  $R_s$  et  $X_s$  caractérisant l'impédance interne .Quels que soient les résultats obtenus précédemment ,pour la suite du problème ,on prendra  $R_s = 0.025 \Omega$  ;  $X_s = 0.075 \Omega$  .

II- Le transformateur alimenté au primaire sous sa tension nominale , débite 100A au secondaire avec un facteur de puissance égal à 0.9(charge inductive).

1) Déterminer graphiquement la tension secondaire du transformateur .En déduire la puissance délivrée au secondaire.

2) Déterminer la puissance absorbée au primaire , ainsi que le facteur de puissance

#### EXERCICE 4 :

L'étude d'un transformateur monophasé 1500V/ 225V ,50Hz de puissance apparente 44 KVA, a donné les résultats suivants :

Essai en continu au primaire ;  $U_1 = 2.5V$  ;  $I_1 = 10A$  ;

Essai à vide  $U_1 = 1500V$  ;  $I_{lv} = 2 A$  ;  $U_{2v} = 225 V$  ;  $P_{lcc} = 300W$  ;

Essai en court-circuit :  $U_{lcc} = 22.5 V$  ;  $I_{lcc} = 22.5A$  ;  $P_{lcc} = 225W$ .

1/ Déterminer le rapport de transformation.

2. a) Calculer la composante active du courant lors de l'essai à vide .

b) Vérifier que l'on peut négliger les pertes par effet joule lors de l'essai à vide .

c) Montrer que les pertes dans le fer sont négligeables dans l'essai en court-circuit , en admettant qu'elles sont proportionnelles au carré de la tension primaire.

3/ Calculer les éléments  $R_s$  et  $X_s$  des enroulements ramenés au secondaire.

4/ Le transformateur alimenté au primaire sous une tension  $U_1 = 1500V$  débite un courant constant d'intensité  $I_2 = 200A$ , quelle que soit la charge .

- a) Déterminer la valeur de  $\varphi_2$ , déphasage entre courant et tension secondaires pour que la chute de tension soit nulle.
- b) Calculer la chute de tension relative pour  $\cos \varphi_2 = 0.8$  (inductif).
- 5/ Déterminer le rendement du transformateur quand il débite 200A avec un facteur de puissance  $\cos \varphi_2 = 0.8$  (charge inductif), le primaire étant alimenté sous 1500V.

### EXERCICE 5 :

Pour étudier un transformateur monophasé 220 V/24V, 50Hz, 200VA, on réalise les essais suivants :

- a) Essai en continu au primaire : sous une tension  $U_1 = 6V$ , on relève l'intensité du courant  $I_1 = 0.95A$ .
- b) Essai à vide : sous la tension primaire  $U_1 = 220V$ , on relève ; puissance fournie au primaire  $P_{lv} = 6W$  ; intensité du courant primaire  $I_{lv} = 0.11A$  ; tension secondaire  $U_{2v} = 24V$ .
- c) Essai en court-circuit : il est réalisé sous tension réduite. l'intensité du courant  $I_{2cc} = 12n$ , on relève : puissance fournie au primaire  $P_{lcc} = 11W$  ; intensité du courant primaire  $I_{lcc} = 0.91A$  ; tension primaire  $U_{lcc} = 20V$ .

1/ Donner la signification des trois valeurs suivantes relevées sur la plaque signalétique : 220 V, 50Hz, 200VA.

2/ Calculer la résistance de l'enroulement primaire.

3/ Proposer un schéma de montage permettant de mesurer  $I_{lv}$ ,  $P_{lv}$ ,  $U_{2v}$ .

4/ Déduire de l'essai à vide :

- le rapport de transformation ;
- les pertes par effet Joule à vide ;
- les pertes dans le fer à vide  $P_{fv}$  ;
- en comparant ces deux dernières grandeurs montrer que l'on peut écrire  $P_{lv} = P_{fv}$ .

5/ Proposer un schéma de montage permettant de réaliser l'essai en court-circuit.

6/ Déduire de l'essai en court-circuit :

- les pertes par effet joule en court-circuit ; dans cet essai, pourquoi peut on négliger les pertes dans le fer ?
- La résistance  $R_s$  et la réactance  $X_s$  des enroulements ramenées au secondaire ;
- Le modèle équivalent du transformateur vu du secondaire

7/ Le transformateur , alimenté au primaire sous la tension nominale, débite au secondaire un courant d'intensité  $I_2 = 8.3 \text{ A}$  dans une charge inductive de facteur de puissance 0.8

- Déterminer graphiquement la tension secondaire  $U_2$  en charge .En déduire la valeur de la chute de tension secondaire en charge.
- A l'aide de la formule approchée , vérifier la valeur  $\Delta U_2$  de la chute de tension au secondaire .
- Calculer le rendement du transformateur .

### EXERCICE 6 :

Etude d'un transformateur monophasé de puissance apparente nominale 35 KVA.

1)essai à vide : le primaire étant alimenté sous sa tension nominale  $U_{1n} = 5\text{KV}$ , 50 Hz, on relève au primaire  $I_{1v} = 0.6\text{A}$  et  $P_{1v} = 300\text{W}$  et au secondaire  $U_{2v} = 220\text{V}$ .

Calculer :

- a) le rapport de transformation ;
  - b) la valeur des pertes fer sachant que la résistance du primaire vaut  $1.5 \Omega$ .
- 2) Essai en court-circuit ;on mesure au primaire  $U_{1cc} = 250\text{V}$ ,  $I_{1cc} = 7\text{A}$ ,  $P_{1cc} = 100\text{W}$ . Déduire de ces résultats les éléments  $R_s$  et  $X_s$  du modèle équivalent du transformateur vu du secondaire.
- 3) Etude en charge

Le primaire étant alimenté sous la tension nominale  $U_{1n} = 5\text{KV}$ , le secondaire débite son courant nominale dans une charge inductive de facteur de puissance égal à 0.6.

- a) calculer l'intensité nominale  $I_{2n}$  du courant secondaire.
- b) Déterminer graphiquement , dans l'hypothèse de Kapp, la tension  $U_2$  aux bornes de la charge .
- c) A l'aide de la formule approchée , vérifier la valeur de la tension  $U_2$ .
- d) Calculer :
  - la puissance active fournie à la charge ;
  - les pertes par effet Joule.
  - le rendement du transformateur correspondant à cette charge .

## Exercices

### Machines à courant continu

Dans tous les exercices, la réaction magnétique d'induit est supposée parfaitement compensée.

#### Exercice 1 :

Un moteur à courant continu, à aimant permanents et à flux constant, a pour valeurs nominales :

La tension aux bornes de l'induit :  $U_n = 12V$  ;

L'intensité du courant d'induit :  $I_n = 2A$  ;

La fréquence de rotation :  $n = 100 \text{tr.s}^{-1}$ .

La résistance de l'induit :  $R = 0.5\Omega$

#### a- Fonctionnement sous tension nominale

1. Représenter le modèle électrique équivalent de l'induit du moteur.

Pour les questions suivantes, les pertes autres que par effet Joule sont négligées.

Calculer, pour le fonctionnement nominal :

2. La force électromotrice  $E$  ;
3. La puissance absorbée  $P_a$  ;
4. La puissance perdue par effet joule  $P_j$  ;
5. La puissance utile  $P_u$  ;
6. Le moment du couple utile  $T_u$ .

#### b- Fonctionnement sous tension variable

On désire que le moteur fournisse le couple nominal pour la fréquence de rotation de  $50 \text{tr.s}^{-1}$ .

1. Justifier que l'intensité du courant reste égale à  $2A$ .
2. Déterminer, pour cette fréquence de rotation, la valeur de la force électromotrice et celle de la tension d'alimentation.

#### c- Etude du démarrage du moteur

1. Rappeler l'expression de la f.é.m  $E$  de l'induit, en fonction du flux inducteur  $\Phi$  et de la vitesse de rotation  $\Omega = 2\pi n$ .
2. En déduire que la f.é.m est nulle si la fréquence de rotation est nulle.

Calculer la tension aux bornes de l'induit, au moment du démarrage, l'intensité étant égale à sa valeur nominale.

**Exercice 2:**

L'induit d'un moteur à courant continu, à excitation indépendante constante, est alimenté sous tension  $U$  variable. On connaît les valeurs nominales :

Tension d'induit :  $U_n = 240V$  ;

Intensité du courant :  $I_n = 30A$  ;

Fréquence de rotation :  $n = 1500 \text{ tr.min}^{-1}$  .

On a mesuré la résistance de l'induit à la température de fonctionnement :  $R = 0.3 \Omega$  .

1. Dessiner le schéma équivalent du moteur et orienter les tensions et les courants.
2. Donner, dans ce cas de fonctionnement, les expressions de la f.é.m  $E$  et du moment du couple électromagnétique  $T$ .
3. Pour le fonctionnement nominal, calculer :
  - a) la f.é.m  $E$  ;
  - b) la puissance électromagnétique  $P$  ;
  - c) le moment du couple électromagnétique  $T$  ;
  - d) les pertes par effet joule dans l'induit ;
  - e) le circuit inducteur absorbant une puissance de  $380 \text{ W}$  et les pertes collectives valent  $450W$ , calculer le rendement du moteur.
4. Au démarrage, on limite l'intensité maximale du courant  $I_d = 1.5I_n$ . Quelle tension minimale faut-il appliquer à l'induit pour qu'il soit parcouru par ce courant. Quelle est alors la valeur maximale du moment du couple électromagnétique ?
5. le moteur entraîne maintenant, à  $n' = 1300 \text{ tr.min}^{-1}$ , Une charge qui impose un couple électromagnétique de moment  $T' = 35N.m$ .

Calculer :

- a) l'intensité  $I'$  du courant dans l'induit ;
- b) La f.é.m de l'induit et sa tension d'alimentation.

**Exercice 3:**

L'inducteur du moteur à excitation indépendante, alimenté sous une tension  $u = 240\text{V}$  absorbe un courant d'intensité constante  $i = 1.2\text{A}$ .

1. Calculer la résistance  $r$  du circuit de l'inducteur.
2. Montrer que la f.é.m de l'induit peut s'écrire  $E = kn$ .

L'induit, dont la résistance est  $R = 0.4\Omega$ , a pour valeurs nominales :

Tension d'alimentation :  $U_n = 240\text{V}$  ;

Intensité du courant :  $I_n = 30\text{A}$  ;

Fréquence de rotation :  $n = 1500\text{tr.min}^{-1}$

L'induit étant alimenté sous une tension  $U$  réglable, la charge entraînée impose un couple électromagnétique de moment  $T$  constant.

3. Montrer que dans ces conditions, l'induit consomme un courant d'intensité constante.
4. L'intensité du courant appelé étant égale à  $I_n$ , Calculer :
  - a) Le moment du couple électromagnétique  $T$  ;
  - b) La tension de décollage  $U_d$ .
5. Pour  $I = I_n$ , établir la relation entre la fréquence de rotation  $n$ , exprimée en  $\text{tr.s}^{-1}$ , et la tension d'alimentation  $U$ . Tracer  $n = f(U)$  pour  $0 \leq U \leq 240\text{V}$ .
6. Calculer le rendement du moteur au fonctionnement nominal, sachant que les pertes collectives valent alors  $P_c = 310\text{W}$

**Exercice 4:**

L'induit d'un moteur à excitation indépendante constante a pour résistance  $R = 0.8\Omega$ . Dans ce problème, on ne tiendra compte que des pertes par effet Joule du rotor.

1. A la fréquence de rotation  $n = 1800\text{tr.min}^{-1}$ , l'induit présente une f.é.m  $E = 270\text{V}$ 
  - a) Montrer que l'on peut écrire  $E = kn$ .
  - b) Calculer la valeur de  $k$ , avec  $n$  en  $\text{tr.s}^{-1}$ .
2. Exprimer en fonction de la tension d'alimentation  $U$  de l'induit et de la fréquence de rotation  $n$  en  $\text{tr.s}^{-1}$  :
  - a) L'intensité  $I$  du courant dans l'induit ;
  - b) Le moment  $T$  du couple électromagnétique.

3. l'induit étant alimenté sous  $U = 280 \text{ V}$ , le moteur entraîne une charge opposant un couple résistant de moment  $T_r = 0.49 n + 21$  ( avec  $n$  en  $\text{tr.s}^{-1}$  ).
  - a) Calculer les coordonnées du point de fonctionnement du groupe moteur-charge.
  - b) En déduire les valeurs de la f.é.m  $E$  et de l'intensité  $I$  du courant dans l'induit.

**Exercice 5**

L'induit d'un moteur à excitation indépendante constante, de résistance  $R = 0.9 \Omega$  est alimenté par une tension  $U$  réglable.

A vide, on relève  $U_0 = 150\text{V}$ ,  $I_0 = 1.3\text{A}$ ,  $n_0 = 1250 \text{ tr.min}^{-1}$ .

1. Calculer, pour ce fonctionnement à vide, les valeurs des pertes collectives et du moment du couple de pertes.
- En charge, l'induit appelle un courant d'intensité constante  $I = 22\text{A}$ .
2. Sous une tension  $U = 170\text{V}$ , le rotor tourne à  $n = 1250 \text{tr.min}^{-1}$ .
    - a) Calculer la valeur de la f.é.m  $E$ .
    - b) Etablir la relation entre  $E$  et  $n$  (en  $\text{tr.min}^{-1}$ ) lorsque  $u$  varie.
    - c) Calculer la tension de décollage  $U_d$ .
  3. la tension d'alimentation étant comprise entre 0 et 220V, déterminer l'équation des variations de  $n$  (en  $\text{tr.min}^{-1}$ ) en fonction de  $U$ .
  4. Montrer que le moment du couple électromagnétique  $T$  est constant et calculer sa valeur numérique.
  5. Le moment du couple de pertes  $T_p$  étant proportionnel à la fréquence de rotation  $n$ , établir l'équation de la caractéristiques mécanique du moteur  $T_u = f(n)$ , avec  $n$  en  $\text{tr.min}^{-1}$ . Tracer cette caractéristique pour  $0 \leq n \leq 1500 \text{tr.min}^{-1}$ .
  6. Le moteur entraîne une charge présentant un couple résistant de moment  $T_r$ , tel que :

<b><math>n(\text{tr.min}^{-1}) :</math></b>	500	600	750	850	1000	1100	1200	1300	1400	1500
<b><math>T_r(\text{Nm}) :</math></b>	22.8	22.9	23.1	23.2	23.5	23.7	23.9	24.2	24.5	25.0

Détermine graphiquement les coordonnées du point de fonctionnement du groupe.

**Exercice 6 :**

Sur la plaque signalétique d'un moteur à courant continu à excitation indépendante, on lit les valeurs nominales suivantes :

Tension aux bornes de l'induit :  $U_n = 220\text{V}$  ;

Intensité du courant dans l'induit :  $I_n = 15\text{ A}$  ;

Tension aux bornes de l'inducteur :  $u = 220\text{V}$  ;

Intensité du courant dans l'inducteur :  $i = 0.8\text{A}$

Fréquence de rotation :  $N_n = 1500\text{ tr.min}^{-1}$  ;

Puissance utile :  $P_{uN} = 3000\text{W}$ .

La résistance à chaud de l'induit est  $R = 1.0\ \Omega$ .

Les pertes mécaniques  $P_m$  sont de  $20\text{W}$  à la fréquence de  $1500\text{ tr.min}^{-1}$ .

On maintient le courant d'excitation constant.

**Le moteur à excitation indépendante**

1) Pour les conditions de fonctionnements nominales, Déterminer :

- a) La puissance absorbée par l'induit et par l'inducteur ;
- b) Le rendement du moteur ;
- c) Les pertes dans le fer
- d) Le moment du couple électromagnétique

2) Le moteur entraîne une machine lui imposant un couple électromagnétique de moment constant quelle que soit la fréquence de rotation du groupe.

- a) Montrer que le courant dans l'induit est constant lui aussi.
- b) Calculer le moment du couple électromagnétique, sachant que l'intensité du courant dans l'induit est de  $12\text{A}$ .
- c) Montrer que la variation de la tension d'induit  $U$  entraîne obligatoirement une variation de la f.é.m  $E$  du moteur et de sa fréquence de rotation  $n$ .

Calculer  $E$  et  $n$  pour  $U = 150\text{V}$ .

- d) Déterminer la tension  $U$  qu'il faut appliquer pour démarrer le groupe avec un courant d'induit de  $12\text{A}$ .

**Exercice 7 :**

Un moteur à excitation indépendante fonctionne à courant d'excitation constant et sous tension d'induit nominale  $U_n = 220\text{V}$ . Sa résistance d'induit est  $R = 2\ \Omega$

1. Le moteur fonctionne en charge .On a relevé une intensité du courant d'induit  $I= 10A$  et une fréquence de rotation  $n= 1000 \text{ tr.min}^{-1}$ 
  - a) Calculer la f.é.m, montrer  $E=K_1.n$ , calculer  $K_1$  avec  $n$  en  $\text{trmn}^{-1}$
  - b) Calculer le moment du couple électromagnétique  $T$ .
  - c) les pertes collectives de ce moteur sont  $P_0 =70\text{w}$  et les pertes d'excitation  $P_{je} = 90\text{W}$ .  
Calculer la puissance utile, le moment du couple utile et le rendement.
2. le moteur fonctionne à vide .En négligeant l'intensité du courant dans l'induit, déterminer la f.é.m  $E_0$  et la variation de la fréquence de rotation  $n_0$ .
3. Montrer que la variation de la fréquence de rotation  $\Delta n= n_0-n$  peut se mettre sous forme  $\Delta n=RI/k_1$  et calculer sa valeur pour  $I = 10A$ .

## Bibliographie:

Philippe Barret, « Machine électrique » Editeur : Ellipses, Edition 2002.

Jean-Louis DALMASSO, « Machines tournantes à courants alternatifs » Editeur : Belin  
Edition : 1985