

Université Echahid Cheikh Larbi Tébessi Tébessa

Institut des mines, Departement électromécanique



# MACHINES ELECTRIQUES



Rédigé par : Dr RECHACH Abdelkrim



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَقَدْ  
رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا

## Préface

Ce support de cours sur les « machines électriques » a été rédigé pour les étudiants de graduation en électromécanique et électrotechnique. Il sera également utile pour tous lecteurs voulant s'initier dans ce domaine ainsi que pour toutes fins utiles.

Nous savons que l'énergie électrique a un large éventail d'applications où les machines électriques jouent un rôle incontournable et vital dans la production industrielle et dans de nombreux autres domaines scientifiques et technologiques.

En général, les étudiants trouvent que les machines électriques sont l'un des sujets les plus difficiles à comprendre, malgré la disponibilité d'un grand nombre de manuels dans ce domaine. Gardant ce fait à l'esprit, ce support a été élaboré de manière systématique en mettant davantage l'accent sur les concepts de base. Chaque chapitre contient un texte indispensable, soutenu par des notes claires et explicites diagrammes pour rendre les sujets auto-parlant dans une large mesure. Des images d'applications et exemples ont été ajoutés dans tous les chapitres pour maintenir une étude et une compréhension régulières.

À la fin de chaque chapitre, suffisamment d'exercices et questions de type objectif, et des questions à réponse courte et d'exemples ont été ajoutés pour en faire une unité complète à tous égards. Les références bibliographiques d'auteurs éminents ont été utilisés et l'auteur affirme avoir géré la rédaction de manière systématique selon les canevas agréés par le ministre de l'enseignement supérieur et la recherche scientifique pour les licenciés et master en électromécanique. Nous affirmons également que la langue du texte est facile et directe, bien que toutes les précautions aient été prises pour, à l'encontre des erreurs, il est cependant impensable de prétendre à la perfection. J'espère qu'il sera utile à ses utilisateurs (étudiants, enseignants et professionnels). Je serai très reconnaissant aux lecteurs de signaler la moindre erreur ou de suggérer une amélioration.



# Table des matières

|                    |     |
|--------------------|-----|
| Préface            | II  |
| Table de matières  | III |
| Liste des figures  | V   |
| Liste des tableaux | IV  |

## Chapitre 1 Circuits électromagnétiques

|  |    |
|--|----|
| 1.1- Objectif  | 1  |
| 1.2- Introduction  | 1  |
| 1.3- Rappels et notions sur l'électromagnétisme                  | 2  |
| 1.3-1. Champ magnétique et son importance                        | 2  |
| 1.3-2. Circuit magnétique et son analyse                         | 2  |
| 1.3-3. Grandeurs magnétiques                                     | 3  |
| 1.3-4. Comparaison entre les circuits magnétiques et électriques | 4  |
| 1.4- Matériaux ferromagnétiques                                  | 6  |
| 1.5- Courbe d'aimantation $B=f(H)$                               | 7  |
| 1.6- Cycle d'hystérésis  | 7  |
| 1.7- Pertes magnétiques  | 9  |
| 1.8- Induction électromagnétique                                 | 10 |
| 1.9- Exercices et leurs résolutions sur le magnétisme            | 13 |

## Chapitre 2 : Machines à courant continu

|  |    |
|--|----|
| 2.1-Introduction   | 18 |
| 2.2-Construction d'une machine à courant continu                       | 18 |
| 2.3-Génération de tension alternative (rôle du collecteur)             | 23 |
| 2.4-Force électromotrice   | 26 |
| 2.5-Principe de fonctionnement, couple et puissance électromagnétique  | 27 |
| 2.6-Classification des machines à courant continu                      | 27 |
| 2.7-Applications des machines à courant continu                        | 30 |
| 2.8-Générateur à courant continu                                       | 31 |
| 2.8.1- Introduction  | 31 |
| 2.8.2- Caractéristiques usuelles                                       | 32 |
| 2.9- Moteur à courant continu  | 35 |
| 2.9.1- Principe de fonctionnement                                      | 35 |
| 2.9.2- Différents types de moteurs à courant continu                   | 37 |
| 2.9.3- Rappel des relations  | 38 |
| 2.9.3.1- Equation de la force contre électromotrice FCEM               | 38 |
| 2.9.3.2- Equation des couples  | 39 |
| 2.9.3.3- Bilan énergétique et rendement                                | 40 |
| 2.9.4- Moteur à excitation indépendante                                | 41 |
| 2.9.4.1- Caractéristiques générales                                    | 41 |
| 2.10- Exercices résolus sur les machines électriques à courant continu | 45 |

## Chapitre 3 : Les Transformateurs

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 3.1-Introduction        | 57 |
| 3.2-Historique          | 58 |
| 3.3-Constitution        | 59 |
| 3.3-1. Noyau magnétique | 59 |
| 3.3-2. Bobinage         | 60 |

|   |    |
|---|----|
| 3.4-Principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé                    | 61 |
| 3.5-Formule de Boucherot et son application au transformateur                   | 62 |
| 3.6- Transformateur réduit  | 63 |
| 3.7-Equation des FEM et FMM d'un transformateur monophasé                       | 64 |
| 3.8- Equation générales de fonctionnement                                       | 64 |
| 3.9-Transformateur parfait ou idéal   | 65 |
| 3.10- Schéma équivalent d'un transformateur réel                                | 66 |
| 3.11- Les pertes de puissance d'un transformateur                               | 67 |
| 3.12- Les différents types de transformateurs                                   | 68 |
| 3.12-1. Les autotransformateurs   | 68 |
| 3.12-2. Les transformateurs de puissance  | 69 |
| 3.12-3. Transformateur variable - variac - alternostat                          | 69 |
| 3.12-4. Transformateur d'isolement  | 70 |
| 3.12-5. Transformateur de courant   | 71 |
| 3.12-6. Transformateur de tension   | 71 |
| 3.13- Plaque signalétique   | 71 |
| 3.14- Transformateur triphasé   | 72 |
| 3.14-1. Utilité   | 72 |
| 3.14-2. Modes de connexion des transformateurs triphasés et groupes de couplage | 73 |
| 3.14-3. Indice de couplage  | 74 |
| 3.14-4. Branchement des transformateurs en parallèle                            | 77 |
| 3.15- Exercices résolus sur les transformateurs                                 | 77 |

#### **Chapitre 4 – Machines à courant alternatif**

|  |     |
|--|-----|
| 4.1- Introduction  | 84  |
| 4.2- Principe de fonctionnement                              | 84  |
| 4.3- Création du champ tournant                              | 86  |
| 4.4- Glissement  | 87  |
| 4.5- Vitesse de synchronisme                                 | 88  |
| 4.6- Machines synchrones                                     | 89  |
| 4.6-1. Qu'est-ce qu'une machine synchrone                    | 89  |
| 4.6-2. Constitution d'une machine synchrone                  | 90  |
| 4.7- Machines asynchrones                                    | 92  |
| 4.7-1. Constitution  | 92  |
| 4.7-2. Variation de la vitesse des moteurs asynchrones       | 98  |
| 4.8- Exercices résolus sur les machines à courant alternatif | 102 |
| Bibliographie  | 104 |

## Liste des figures

| Figure      | Nomenclature  | Page |
|-------------|---|------|
| Figure 1.1  | Champ magnétique et lignes d'induction magnétique                         | 2    |
| Figure 1.2  | Solénoïde électromagnétique   | 3    |
| Figure 1.3  | Circuit électrique et magnétique d'un transformateur monophasé            | 5    |
| Figure 1.4  | Grains microcristallins dans un morceau de NdFeB                          | 6    |
| Figure 1.5  | Alignement des moments magnétiques en domaines                            | 7    |
| Figure 1.6  | Regroupement des domaines de Weiss séparés par les parois de Bloch        | 7    |
| Figure 1.7  | Forme de la courbe de première aimantation d'un acier moulé               | 7    |
| Figure 1.8  | Le circuit à l'aide duquel on trace le cycle d'Hystérésis                 | 8    |
| Figure 1.9  | Courants de Foucault (I, rouge) induits dans une plaque métallique (C)    | 9    |
| Figure 1.10 | Le feuilletage permet de réduire les pertes par courants de Foucault      | 10   |
| Figure 1.11 | Déplacement de l'aimant par rapport au conducteur et loi de Faraday       | 11   |
| Figure 1.12 | La règle des trois doigts   | 12   |
| Figure 1.13 | Les rails de Laplace  | 13   |
| Figure 2.1  | Différentes parties constituant une machine électrique tournante          | 19   |
| Figure 2.2  | Culasse magnétique sur laquelle sont montés les pôles principaux          | 20   |
| Figure 2.3  | Pôle principal avec épanouissement polaire                                | 20   |
| Figure 2.4  | Différentes parties constituant l'induit                                  | 21   |
| Figure 2.5  | Dispositif porte balais monté sur la partie fixe d'une machine électrique | 22   |
| Figure 2.6  | Schéma de principe d'un générateur élémentaire à 1 tour par seconde       | 23   |
| Figure 2.7  | Schéma de principe d'un générateur élémentaire à 1 tour par seconde       | 24   |
| Figure 2.8  | Machines asynchrones à rotors bobinés et bagues collectrices              | 25   |
| Figure 2.9  | Machines à courant continu avec collecteur                                | 25   |
| Figure 2.10 | Machines à quatre bobines et collecteur à quatre segments                 | 26   |
| Figure 2.11 | Force électromotrice dans une machine bipolaire                           | 27   |
| Figure 2.12 | Machine à courant à excitation indépendante                               | 28   |
| Figure 2.13 | Machine à courant à excitation en série                                   | 29   |
| Figure 2.14 | Machine à courant à excitation en parallèle                               | 29   |
| Figure 2.15 | Machine à courant à excitation composée                                   | 30   |
| Figure 2.16 | Machine à courant continu à excitation composée                           | 32   |
| Figure 2.17 | Modèle équivalent d'une génératrice à excitation indépendante             | 33   |
| Figure 2.18 | Montage d'essai pour la caractéristique à vide d'une génératrice DC       | 33   |
| Figure 2.19 | Caractéristique à vide de la génératrice DC                               | 34   |
| Figure 2.20 | Caractéristiques à vide pour différentes valeurs de vitesse               | 34   |
| Figure 2.21 | Caractéristique linéaire $E_0$ en fonction de la vitesse                  | 35   |
| Figure 2.22 | Caractéristique en charge de la génératrice DC                            | 35   |
| Figure 2.23 | Caractéristique de réglage d'une génératrice DC                           | 36   |
| Figure 2.24 | Production du couple dans un moteur DC                                    | 37   |
| Figure 2.25 | Courbes couple/vitesse d'un moteur DC à excitation séparée                | 38   |
| Figure 2.26 | Schéma de différents types d'excitation des moteurs DC                    | 38   |
| Figure 2.27 | Circuit équivalent d'un moteur DC à excitation indépendante               | 38   |
| Figure 2.28 | Schéma du bilan énergétique   | 40   |
| Figure 2.29 | Schéma du circuit équivalent d'un moteur DC                               | 41   |
| Figure 2.30 | Caractéristique à vide à flux constant d'un moteur DC                     | 42   |
| Figure 2.31 | Caractéristique mécanique du moteur DC                                    | 43   |

|             |   |     |
|-------------|---|-----|
| Figure 2.32 | Caractéristique des couples du moteur DC  | 44  |
| Figure 2.33 | Détermination du point de fonctionnement d'un moteur DC                                       | 44  |
| Figure 3.1  | Transformateurs électriques   | 57  |
| Figure 3.2  | Transformateurs triphasés HT/MT suspendus a des supports électriques                          | 59  |
| Figure 3.3  | Schématisation d'un transformateur électrique monophasé                                       | 60  |
| Figure 3.4  | Transformateur triphasé montrant le circuit magnétique et les bobines dans la cuve d'huile    | 61  |
| Figure 3.5  | Différents types de circuit magnétique et bobinages   | 61  |
| Figure 3.6  | Présentation schématique d'un transformateur monophasé  | 62  |
| Figure 3.7  | Schéma équivalent en T d'un transformateur  | 66  |
| Figure 3.8  | Bilan de puissance d'un transformateur monophasé  | 68  |
| Figure 3.9  | Schéma symbolique d'un autotransformateur   | 68  |
| Figure 3.10 | les transformateurs de puissance  | 69  |
| Figure 3.11 | Autotransformateur à rapport variable   | 70  |
| Figure 3.12 | Présentation réelle et schématique d'un transformateur de courant                             | 71  |
| Figure 3.13 | Transformateur de tension   | 71  |
| Figure 3.14 | Plaque signalétique d'un transformateur triphasé de 400KVA                                    | 72  |
| Figure 3.15 | Schématisation de 3 transformateurs à la place d'un seul transformateur triphasé              | 73  |
| Figure 3.16 | Plaque a bornes d'un transformateur triphasé  | 74  |
| Figure 3.17 | Indice horaire de couplage d'un transformateur triphasé                                       | 75  |
| Figure 3.18 | Schéma de connexion et diagramme vectoriel du couplage $Yy_0$                                 | 75  |
| Figure 3.19 | Schéma de connexion et diagramme vectoriel du couplage $Dy_{11}$                              | 76  |
| Figure 4.1  | Création d'un courant induit dans une spire en court-circuit                                  | 85  |
| Figure 4.2  | Règle des trois doigts de la main droite  | 85  |
| Figure 4.3  | Principe d'un moteur asynchrone triphasé  | 86  |
| Figure 4.4  | Champs générés par action d'un champ monophasé sur une aiguille aimantée                      | 86  |
| Figure 4.5  | Action d'un champ triphasé sur une aiguille aimantée  | 87  |
| Figure 4.6  | Principe de machine à induit fixe est inducteur tournant et inversement                       | 90  |
| Figure 4.7  | Stator composé d'une culasse encochée et une carcasse sous forme de ailettes d'un alternateur | 91  |
| Figure 4.8  | Rotor bobinés à pôles lisses et système a bagues sur lesquelles glissent les balais           | 91  |
| Figure 4.9  | Différentes conceptions de Stators de moteurs asynchrones                                     | 93  |
| Figure 4.10 | Les parties d'un moteur asynchrone : le rotor à gauche et le stator à droite                  | 94  |
| Figure 4.11 | Eclatement d'un moteur à rotor à cage   | 94  |
| Figure 4.12 | Courbes des couples en fonction de la vitesse selon le type du moteur a cage                  | 95  |
| Figure 4.13 | Rotor à cage  | 96  |
| Figure 4.14 | Configuration de la double et à cage profonde   | 97  |
| Figure 4.15 | Rotor bobiné d'un moteur asynchrone avec balais frottant sur les bagues en cuivre             | 98  |
| Figure 4.16 | Quadrants de fonctionnement   | 99  |
| Figure 4.17 | Schéma équivalent en (T) d'un moteur asynchrone monophasé                                     | 99  |
| Figure 4.18 | Caractéristique du couple en fonction de la vitesse $C = f(\omega)$                           | 101 |

## *Liste des tableaux*

| <b>Tableau</b> | <b>Nomenclature</b>  | <b>Page</b> |
|----------------|--|-------------|
| Tableau 1.1    | Perméabilité relative de quelques principaux matériaux magnétiques                 | 4           |
| Tableau 1.2    | Comparaison entre les circuits magnétiques et électriques                          | 5           |
| Tableau 2.1    | Pertes dans une machine électrique   | 40          |
| Tableau 2.2    | Récapitulation des pertes selon l'arbre énergétique                                | 41          |
| Tableau 4.1    | Vitesses de synchronisme fonction du nombre de pôles et de la fréquence du courant | 88          |





---

## Chapitre 1 : Circuits électromagnétiques

### 1.1 Objectif

À la fin de cette unité, les lecteurs seront en mesure de comprendre : le champ magnétique et sa signification, le circuit magnétique, les termes importants liés au magnétisme et aux circuits magnétiques, les similitudes et les différences entre les circuits magnétiques et électriques, le flux de fuite et comment affecte-t-il les circuits magnétiques, l'hystérésis magnétique et la perte dans le fer, le phénomène d'induction électromagnétique et les lois de Faraday sur l'induction électromagnétique.

Ils seront aussi renseignés sur les dispositifs électromécaniques de conversion d'énergie, comment le couple se développe-t-il par l'alignement de deux champs, les facteurs dont dépend le couple et comment déterminer la direction du couple ou de la FEM induite dans les machines électriques tournantes.

### 1.2 Introduction

L'énergie électrique est toujours avantageuse comparée aux autres sources énergétiques, car elle est moins chère, facile à transporter, facile à contrôler et plus efficace. L'énergie électrique est généralement générée à partir de ressources naturelles telles que l'eau (centrales hydrauliques) ; hydrocarbures tel que le charbon, gaz naturel et diesel (centrales thermiques) ; fission atomique (centrales nucléaires) ; énergie du vent (turbines éoliennes), rayonnement solaire (stations photovoltaïques) ; sources hydrothermales (centrales géothermiques) ; etc. Cependant, pour mieux l'utiliser, elle est à nouveau convertie en d'autres formes d'énergie telles que mécanique, chaleur, lumière, etc. C'est un fait bien connu que les entraînements électriques ont été universellement adoptés par l'industrie en raison de leurs avantages inhérents. La conversion énergétique est perpétuellement nécessaire et les machines qui convertissent l'énergie mécanique en énergie électrique et inversement sont appelés électromécaniques.

Le fonctionnement de toutes les machines électriques telles que les machines à courant continu, les transformateurs, les machines synchrones et asynchrones, etc., repose sur leurs circuits magnétiques. Le chemin fermé suivi par les lignes de force magnétiques s'appelle un circuit magnétique. Le fonctionnement de tous les appareils électriques (par exemple, transformateurs, générateurs, moteurs, etc.) dépend du magnétisme produit par leurs circuits magnétiques. Par conséquent, pour obtenir les caractéristiques requises de ces dispositifs, leurs circuits magnétiques doivent être conçus avec soin. Dans ce chapitre, nous concentrerons notre attention sur les principes de base des circuits magnétiques et leurs applications en tant que dispositifs électromécaniques de conversion d'énergie.

### 1.3 Rappels et notions sur l'électromagnétisme

#### 1.3.1- Champ magnétique et son importance

La région autour d'un aimant où ses pôles présentent une force d'attraction ou de répulsion est appelée champ magnétique. L'existence du champ magnétique en un point autour de l'aimant peut également être déterminée en plaçant une aiguille aimantée à cet endroit, comme illustré à la Figure 1.1. Bien qu'on ne puisse pas voir les lignes magnétiques sauf avec des appareils de mesure, pourtant leur concept est très utile pour comprendre l'effet de divers champs magnétiques. On suppose alors que les lignes de force magnétiques possèdent les propriétés suivantes : La direction des lignes de force magnétiques va du pôle N au pôle S à l'extérieur de l'aimant. Mais à l'intérieur de l'aimant, leur direction va du pôle S au pôle N, Ils forment une boucle fermée, Leur tendance est de suivre le chemin le moins réticent, Ils agissent comme des cordes tendues, essayant toujours de se raccourcir, Ils ne se croisent jamais, Ils se repoussent lorsqu'ils sont parallèles et dans la même direction et Ils restent insensibles aux matériaux non magnétiques [1].

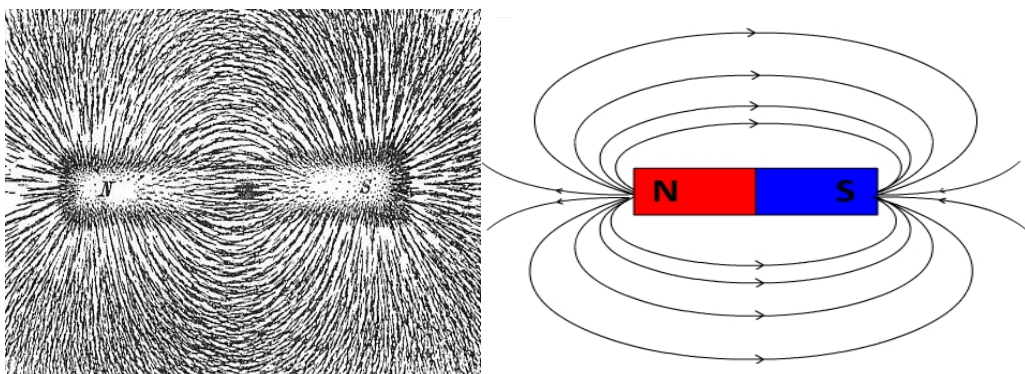


Figure 1.1 Champ magnétique et lignes d'induction magnétique

#### 1.3.2- Circuit magnétique et son analyse

Le chemin fermé suivi par le flux magnétique est appelé un circuit magnétique. Un circuit magnétique est généralement constitué de matériaux magnétiques à haute perméabilité (par exemple, fer, acier doux, etc.). Dans ce circuit, le flux magnétique commence à partir d'un point et se termine au même point après avoir bouclé son chemin. La figure 1.2 montre un solénoïde à  $N$  spires bobinées. Lorsque le courant  $I(A)$  passe à travers le solénoïde, le flux magnétique  $\Phi$  (Wb) s'établit à l'intérieure de celle-ci et si on insère un noyau ferromagnétique dedans la circulation du champ magnétique devient plus facile vu que la perméabilité du fer dépasse largement celle de l'air.

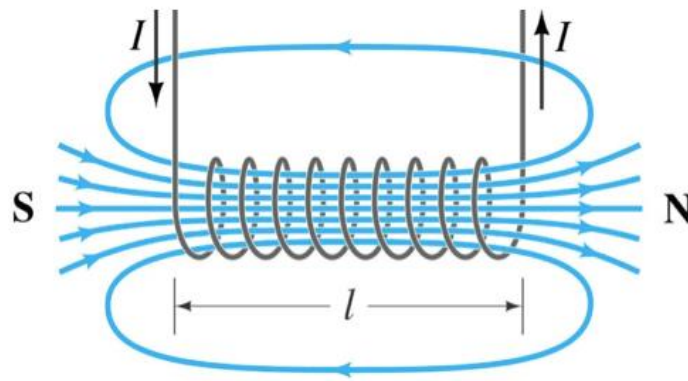


Figure 1.2 Solénoïde électromagnétique

### 1.3.3- Grandeurs magnétiques

En étudiant les circuits magnétiques, en général, on rencontre les termes suivants :

**Champ magnétique** : La région autour d'un aimant où ses pôles présentent une force d'attraction ou la répulsion est appelée champ magnétique.

**Flux magnétique** : La quantité de lignes de force magnétiques établies dans un circuit magnétique est appelée Flux magnétique. Son unité est le weber (Wb). Il est analogue au courant électrique  $I$  dans un circuit électrique.

**Induction magnétique** : c'est la densité de flux magnétique en un point. Il est généralement représenté par la lettre "B". Son unité est le Wb/m<sup>2</sup> ou Tesla.

**Perméabilité** : c'est la capacité d'un matériau à conduire des lignes de force magnétiques. Elle est généralement représentée par  $\mu$ . Plus la perméabilité d'un matériau est grande, plus sa conductivité est grande et vice-versa. La perméabilité de l'air ou du vide est la plus faible et est représentée par  $\mu_0$  (où  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m).

**Perméabilité relative** : La perméabilité absolue (ou réelle)  $\mu$  d'un matériau magnétique est très supérieure à la perméabilité absolue de l'air  $\mu_0$ . La perméabilité relative d'un matériau magnétique est donné par rapport à l'air ou au vide. Par conséquent, le rapport de la perméabilité du matériau  $\mu$  à la perméabilité à l'air ou au vide  $\mu_0$  est appelée la perméabilité relative  $\mu_r$  du matériau. C'est-à-dire,  $\mu_r = \mu / \mu_0$  ou  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ . Évidemment, la valeur de la perméabilité relative de tous les matériaux non magnétiques est également 1. Cependant, sa valeur est élevée pour le fer et ses alliages ces alliages notamment avec le nickel, Cobalt et Silicium). Dans le tableau 1.1 sont montrées les perméabilités relatives de quelques matériaux ferromagnétiques.

**Lignes du champ magnétique** : sont par définition, l'ensemble des courbes « en tout point » tangentes à B [2].

Tableau 1.1 Perméabilité relative de quelques principaux matériaux magnétiques

| Matériau $\mu_r$          | Composition   | $M_r$            | Utilisation           |
|---------------------------|---------------|------------------|-----------------------|
| Fer Armco                 | Fer pur       | 10.000           | Relais, électroaimant |
| Acier Hypersyl            | Si à 3%       | 40.000 à 50.000  | transformateurs       |
| Mumétal Permalloy         | C Ni à 80%    | 70.000 à 130.000 | Blindages magnétiques |
| Acier au cobalt Permendur | V Co à 35-50% | 3.500            | machines tournantes   |

Intensité du champ magnétique : est la mesure de l'importance d'un champ magnétique. Elle est notée H, Dans les circuits magnétiques, elle est définie en la force magnétomotrice (Fmm) par la longueur de la ligne d'induction (chemin magnétique). Mathématiquement :

$$H = F_{mm}/L = N.I /L \text{ en (A.Tr/m)} \quad (1.1)$$

Force magnétomotrice (FMM) : La force magnétomotrice ou magnéto motricité (Unité : ampère-tour) est une force physique motrice qui génère un flux magnétique. Dans ce contexte, l'expression « force motrice » est utilisée dans le sens général du potentiel de travail qui lui est semblable, mais distincte de la force mesurée en newtons. La force magnétomotrice tire son nom de son rôle dans les circuits magnétiques analogue à celui de la force électromotrice dans les circuits électriques. En général la s'exprime par :  $F_{mm} = N.I$  en ampères-tours (ou AT). Elle est analogue à la FEM dans un circuit électrique.

Réductance (R) : L'opposition offerte au flux magnétique par un circuit magnétique est appelée sa réductance. Cela dépend de la longueur (l), de l'aire de la section transversale (s) et de la perméabilité ( $\mu = \mu_0.\mu_r$ ) du matériau qui compose le circuit magnétique. Elle se mesure en. Elle analogue à la résistance dans le circuit électrique.

$$R = l / s.\mu \text{ en (A.T/Wb)}, \quad (1.2)$$

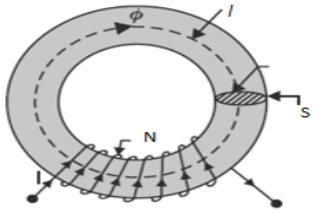
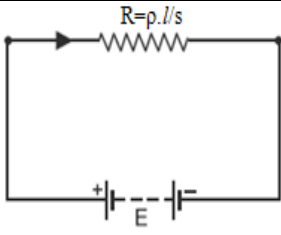
Perméance : C'est une mesure de la facilité avec laquelle le flux peut être installé dans le matériau. C'est juste l'inverse de la réductance du matériau et se mesure (en Wb/A.Tr ou henry). Elle est analogue à la conductance en circuit électrique.

### 1.3.4- Comparaison entre les circuits magnétiques et électriques

Bien que les circuits magnétiques et électriques aient beaucoup de similitudes, mais ils ne sont toujours pas analogues. On trouve les deux circuits jumelés dans le transformateur montré à titre d'exemple dans la figure 1.3 ci-dessous. Dans cette dernière, un assemblage de circuit magnétique fermé ou les tôles ferromagnétiques canalisent le flux magnétique. Les circuits électriques primaire et secondaire sont électriquement constitués d'enroulements. Le primaire est alimenté par une tension sinusoïdale et le circuit secondaire pouvant comporter un nombre

différent de spires de celui du circuit primaire. Une comparaison entre le circuit magnétique et électrique est présentée dans le tableau 1.2.

Tableau 1.2 Comparaison entre les circuits magnétiques et électriques

| Circuit magnétique  | Circuit électrique   |
|---|--|
|    |    |
| Le chemin fermé du flux magnétique est appelé circuit magnétique  | Le chemin fermé du courant électrique est appelé circuit électrique  |
| Flux = FMM/R  | Courant = FEM/Résistance   |
| Flux, $\Phi$ in Wb  | Courant I en Ampère  |
| FMM in A.Tr   | FEM en V   |
| Réductance  | Résistance   |
| Perméance = 1/réductance  | Conductance = 1/résistance   |
| Perméabilité, $\mu$   | Conductivité = 1/résistivité   |
| Inductance $B = \Phi / S$ en Wb/m <sup>2</sup> ou Tesla   | Densité du courant $J = I/s$ en A/m <sup>2</sup>   |
| Excitation magnétique, $H = NI/l$ ; (A.Tr/m)  | Intensité Electrique, $E = V/d$  |
| Le flux magnétique ne circule pas   | Le courant circule dans le circuit   |
| Il n'y a pas d'isolant magnétique, le flux peut être mis en place même dans l'air   | Il y a plusieurs isolateurs et l'air en fait partie du fait que le courant ne peut pas le traverser  |
| La valeur de la perméabilité n'est pas constante pour un matériau donné. Elle varie avec la densité du flux. Cela implique que la réductance dans le circuit magnétique n'est pas constante et dépend plutôt de B | La valeur de la résistivité varie très légèrement avec la température, donc la résistance du circuit électrique est pratiquement constante.                                      |
| Aucune énergie n'est dépensée dans le circuit magnétique. En d'autres termes, l'énergie est juste nécessaire pour créer le flux et non pour le maintenir  | Lorsque le courant circule dans le circuit électrique, l'énergie est dépensée tant que le courant circule. Cette énergie est dissipée dans l'environnement sous forme de chaleur |

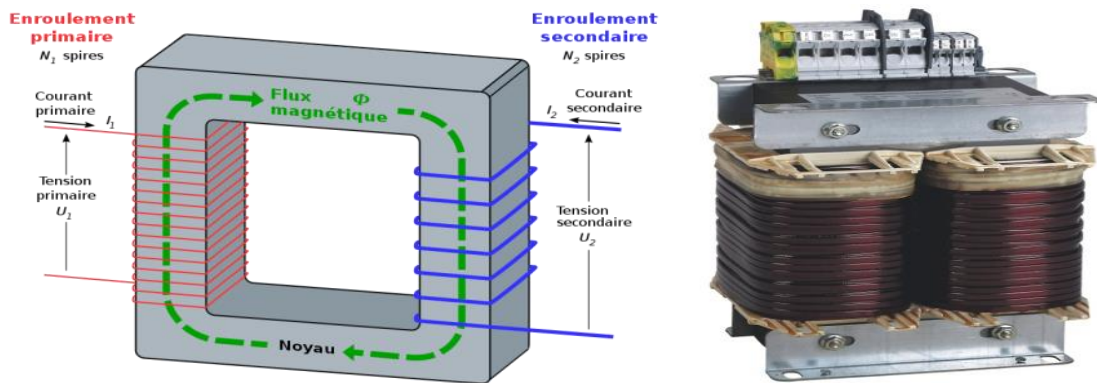


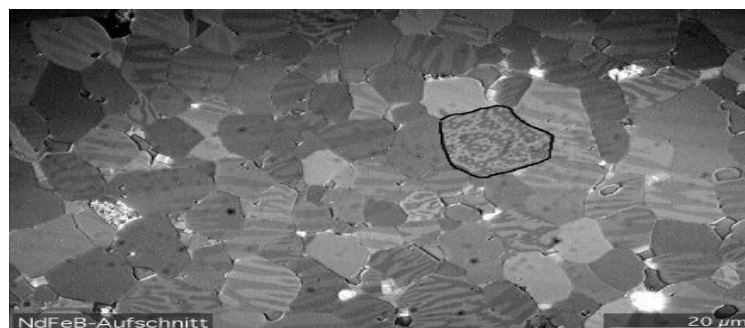
Figure 1.3 Circuit électrique et magnétique d'un transformateur monophasé

## 1.4 Matériaux ferromagnétiques

Ce sont des corps qui possèdent des propriétés magnétiques élevées. Le fait fondamental est que les distances interatomiques dans les matériaux ferromagnétiques sont telles que se manifeste une tendance des moments magnétiques à s'orienter spontanément dans la direction de facile aimantation. L'alignement des différents moments selon une direction se traduit par l'anisotropie magnétique du matériau. Ce comportement ne peut être interprété de façon classique et ne peut être décrit qu'avec les théories de physique quantique.

Dans les matériaux ferromagnétiques, les moments magnétiques se rangent dans la même direction en présence d'un champ magnétique après avoir été dans leur désordre initial. Ils sont d'autant plus rangés sous forme matricielle que le champ magnétique est d'autant plus intense. Pierre-Ernest Weiss 1907 a bien élucidé ce phénomène. En effet, les moments magnétiques de chaque matériau se regroupent dans des "domaines", selon leurs différentes orientations (voir figure 1.4). Les domaines se fusionnent entre eux, à mesure que le champ est plus intense, mais en absence de ce dernier, leurs orientations aléatoires annulent le champ macroscopique global. Les figures 1.4, 1.5 et 1.6 illustrent bien les domaines magnétiques de Weiss, notamment celle ou les grains microcristallins dans un morceau de NdFeB avec des bien visibles grâce à un microscope Kerr. Notons que les parois des domaines et leurs mouvances ont bien été définies par Bloch [3-5].

Une paroi de Bloch est une zone de transition entre deux domaines de Weiss dans un matériau. C'est une région où les moments magnétiques changent graduellement d'un domaine de Weiss à l'autre, dans le plan de la paroi. L'origine de la paroi de Bloch s'explique par le fait qu'une transition graduelle est beaucoup moins coûteuse en énergie que la transition abrupte. Une illustration de la transition est montrée à la figure 2.7.



**Figure 1.4** Grains microcristallins dans un morceau de NdFeB (alliage utilisé dans les aimants au néodyme) avec des domaines magnétiques rendus visibles grâce à un microscope Kerr. Les domaines sont les rayures claires et foncées visibles dans chaque grain.

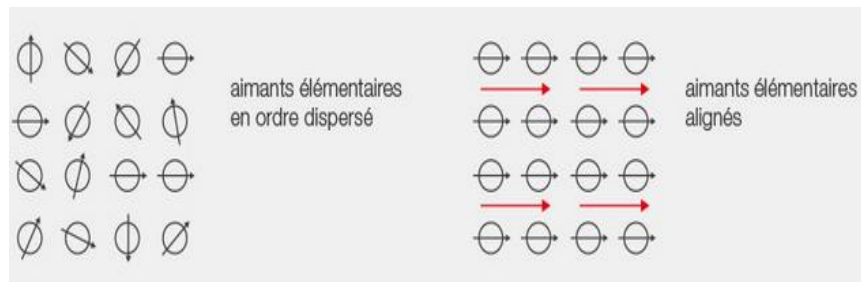


Figure 1.5 Alignement des moments magnétiques en domaines sous l'effet d'un champ magnétique extérieur

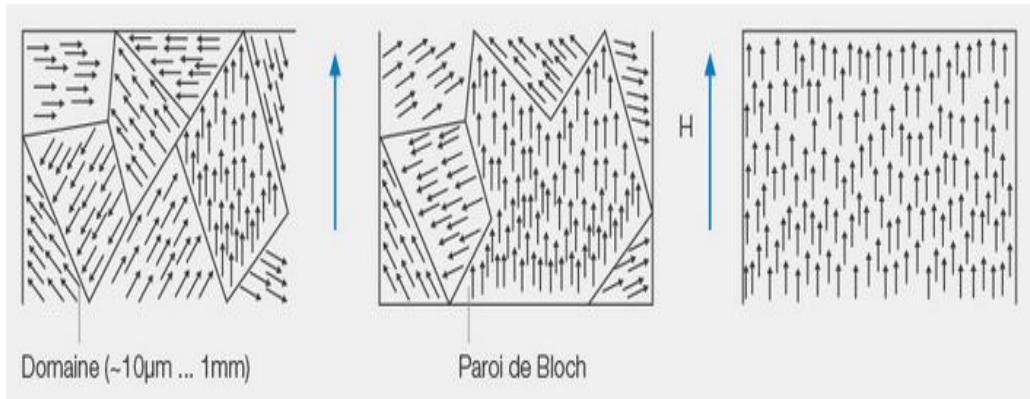


Figure 1.6 Regroupement des domaines de Weiss séparés par les parois de Bloch

### 1.5 Courbe d'aimantation $B=f(H)$

Le graphique tracé entre l'induction magnétique  $B$  et la force de magnétisation  $H$  d'un matériau est appelé courbe de première aimantation. La forme générale de cette courbe est illustrée à la Figure 1.7. Elle est non linéaire, ce qui veut dire que la perméabilité relative ( $\mu_r=B/\mu_0.H$ ) des matériaux est variable. Il est à noter que cette forme est commune pour tous matériaux ferromagnétiques mais a des valeurs différentes. Il est impossible de trouver deux courbes confondues pour différents matériaux.

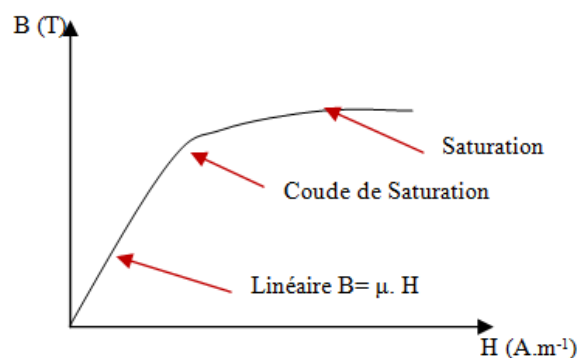


Figure 1.7 Forme de la courbe de première aimantation d'un acier moulé

### 1.6 Cycle d'hystérésis

Lorsqu'un matériau magnétique est magnétisé d'abord dans un sens puis dans l'autre (c'est-à-dire un cycle de magnétisation), on constate que la densité de flux  $B$  est en retard sur la

magnétisation appliquée  $H$  [5]. Ce phénomène est connu sous le nom d'hystérésis magnétique. Hystérésis est le terme dérivé du mot grec hysterein qui signifie être à la traîne ou en retard. Pour comprendre le phénomène complet de l'hystérésis magnétique, considérons un anneau de matériau magnétique sur lequel un solénoïde est enroulé uniformément comme illustré à la Figure 1.8. Le solénoïde est connecté à un courant continu via un interrupteur réversible bipolaire bidirectionnel (position 1). Lorsque  $H$  est augmenté progressivement en augmentant le courant dans le solénoïde (en diminuant la valeur de  $R$ ), la densité du flux  $B$  augmente également jusqu'à ce que le point de saturation soit atteint et la courbe ainsi obtenue est  $oa$ . Si maintenant la force de magnétisation est progressivement réduite à zéro en diminuant le courant dans le solénoïde. La densité de flux ne devient pas nulle et la courbe ainsi obtenue est  $ab$  comme le montre la Figure 1.9. Lorsque la force magnétisante  $H$  est nulle, la densité de flux a toujours la valeur  $ob$ .

**Magnétisme résiduel et rémanence :** Cette valeur de densité de flux 'ob' retenue par le matériau magnétique est appelée aimantation rémanente. C'est le pouvoir de retenir une partie du magnétisme résiduel est appelé rémanence du matériau. Pour démagnétiser l'anneau magnétique, la force de magnétisation  $H$  est inversée en inversant le sens du passage du courant dans le solénoïde. Ceci est réalisé en changeant la position du double pôle (position 2). Lorsque  $H$  est augmenté dans le sens inverse,  $H$  décroît et devient nul et la courbe suit le chemin  $bc$ .

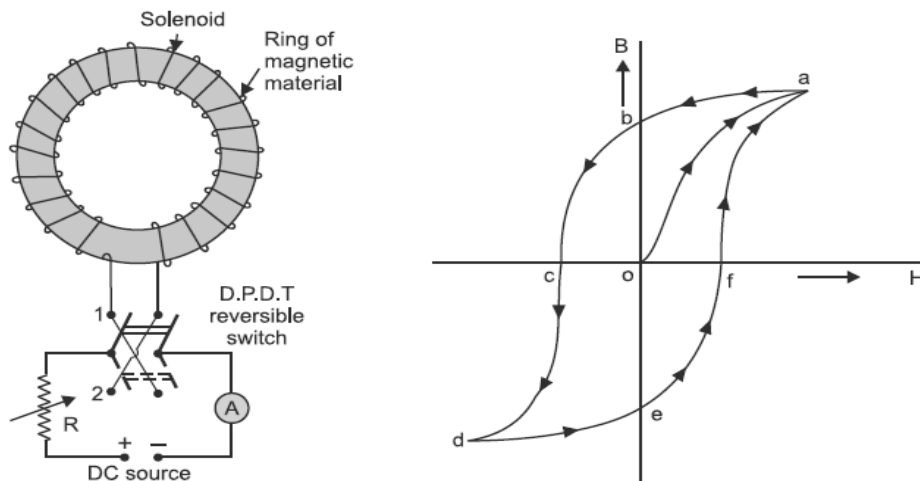


Figure 1.8 Circuit à l'aide duquel on trace le cycle d'Hystérésis montré à droite

**Force coercitive :** Cette valeur de force magnétisante  $oc$  nécessaire pour essayer le magnétisme résiduel est appelée force coercitive. Pour terminer la boucle, la force de magnétisation  $H$  est encore augmentée dans le sens inverse jusqu'à ce que la saturation atteigne (point 'd') et la courbe suit le chemin  $cd$ . Encore une fois  $H$  est réduit à zéro et le courbe suit le chemin de 'oe' représente le magnétisme résiduel. Ensuite,  $H$  est augmenté dans le sens positif en changeant la



position de l'interrupteur réversible en position "1" et en augmentant le flux de courant dans le solénoïde. La courbe suit le chemin de 'efa' et la boucle est bouclée. Encore une fois, la force de magnétisation est utilisée pour éliminer le magnétisme résiduel 'oe'. La boucle (abcdefa) ainsi obtenue, est appelée cycle d'hystérésis.

### 1.7 Pertes magnétiques

**Pertes d'hystérésis** : Lorsqu'une force magnétisante est appliquée, le matériau magnétisé est une agglomération d'aimants moléculaires alignés dans une direction. Cependant, lorsque la force magnétisante est inversée, le frottement interne des aimants moléculaires s'oppose à l'inversion du magnétisme, ce qui entraîne une hystérésis. Pour surmonter ce frottement, le travail effectué par la force magnétisante contre ce frottement interne et les aimants moléculaires produisent de la chaleur. Cette énergie, dissipée sous forme de chaleur en raison de l'hystérésis, est appelée perte par hystérésis. La perte par hystérésis se produit dans toutes les parties magnétiques des machines électriques. Cette perte entraîne un gaspillage d'énergie sous forme de chaleur et augmente la température de la machine. Par conséquent, les matériaux magnétiques appropriés sont sélectionnés pour la construction de telles machines, notamment l'acier au silicium qui est le plus approprié avec une perte d'hystérésis minimale.

**Courants de Foucault** : On appelle courants de Foucault les courants électriques créés dans une masse conductrice, soit par la variation d'un champ magnétique extérieur traversant ce milieu, soit par un déplacement de cette masse dans un champ magnétique (voir figure 1.9). Ils sont une conséquence de l'induction électromagnétique. Les courants de Foucault sont responsables d'une partie des pertes (dites pertes par courants de Foucault) dans les circuits magnétiques des machines électriques alternatives et des transformateurs [6].

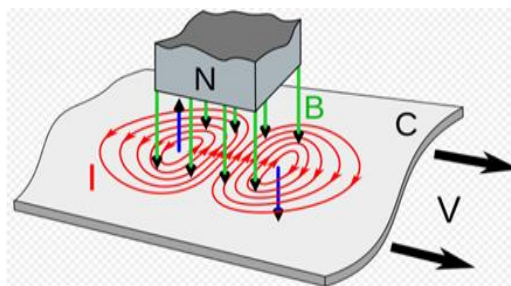


Figure 1.9 Les courants de Foucault (I, rouge) induits dans une plaque métallique (C)

C'est la raison pour laquelle les circuits magnétiques sont constitués de tôles feuilletées afin de limiter ces courants et les pertes par effet Joule qui en découlent, ce qui améliore le rendement global des transformateurs comme c'est illustré sur la figure 1.10.

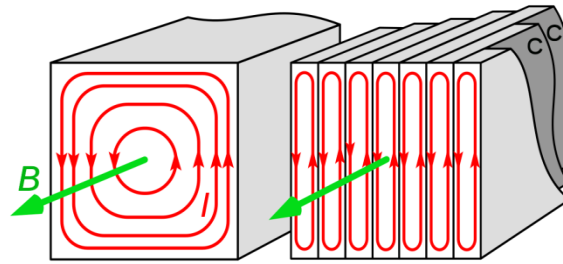


Figure 1.10 Le feuilletage permet de réduire les pertes par courants de Foucault

## 1.8 Induction électromagnétique

Le phénomène par lequel une force électromotrice est induite dans un circuit, à partir d'un flux magnétique est appelé induction électromagnétique. L'induction électromagnétique est un phénomène physique conduisant à l'apparition d'une force électromotrice dans un conducteur électrique soumis à un flux de champ magnétique variable. Cette force électromotrice peut engendrer un courant électrique dans le conducteur. Ce phénomène est d'une importance pratique capitale. Il est notamment utilisé dans les générateurs et les transformateurs électriques, les bobines, ou encore les fours à induction grâce aux courants de Foucault.

Pour comprendre le phénomène de l'induction, considérons un conducteur électrique placé dans un champ magnétique. Deux cas particuliers du phénomène d'induction sont alors possibles :

L'induction de Lorentz : Lorsque le champ magnétique est stationnaire et le conducteur électrique se déplace. Ce cas particulier est exploité dans les machines à courant continu. La f.é.m. induite a pour expression :

$$e = B \ell v \quad (1.3)$$

L'induction de Neumann : Le conducteur électrique est fixe et le champ magnétique est variable. Dans ce référentiel, la force de Lorentz est nulle. Cependant, on observe la variation du flux du champ magnétique. Le phénomène est exploité dans les alternateurs, les moteurs asynchrones et moteurs à induction ainsi que des transformateurs électriques.

Lois de l'induction magnétique de Faraday: En 1831, lors de ces expérimentations, Michael Faraday a mis à jour l'une des plus importantes découvertes en électromagnétisme dite actuellement « lois de l'induction électromagnétique de Faraday ». Elle révèle la relation fondamentale entre la tension d'alimentation et le flux magnétique dans un circuit. Les lois de Faraday sont :

Si le flux the flux magnétique varie en fonction du temps, une force électromotrice (tension) est induite instantanément.

La valeur de la tension de la FEM induite est proportionnelle à l'amplitude de la variation du flux magnétique.

Par définition et selon le système international des unités (SI) ; quand le flux magnétique varie d'un weber par seconde (1Wb/s), une FEM de 1V est induite dans son intervalle prédéfini. Par conséquent, si le flux varie dans un enroulement de N spires, la FEM induite est donnée par :

$$E = N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.4)$$

Où : E est la force électromotrice induite (v)

N : Nombre de spires de l'enroulement ou bobine

dΦ : Changement du flux dans la bobine (Wb)

dt : temps Durant lequel le changement a été fait (s)

La loi de l'induction électromagnétique de Faraday a bien ouvert la porte à une multitude d'applications pratiques et a établi la base du fonctionnement des transformateurs, des générateurs et des moteurs électriques.

**Tension induite dans un conducteur** : Dans de nombreux moteurs et générateurs, les bobines se déplacent par rapport à un flux fixe dans l'espace. Le mouvement relatif produit une variation du flux reliant les bobines et par conséquent, une tension est induite selon la loi de Faraday. Cependant, dans ce cas particulier (bien que courant), il est plus facile de calculer la tension induite en référence aux conducteurs, plutôt qu'en référence à la bobine elle-même. En effet, chaque fois qu'un conducteur coupe un champ magnétique, une tension est induite à ses bornes (voir la figure 1.11). La valeur de cette tension induite est donnée par [7] :

$$E = B \cdot l \cdot v \quad (1.5)$$

Où : E : force électromotrice induite (v)

B : Induction magnétique en Tesla

l : longueur du conducteur en (m)

v : Est la vitesse de déplacement du conducteur dans le champ magnétique en question (m/s)

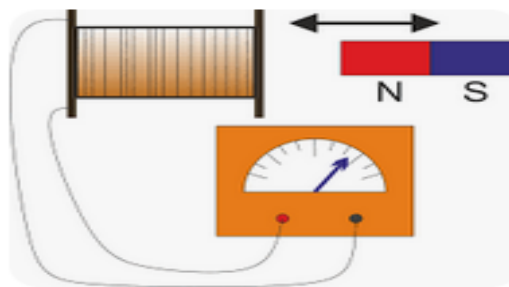


Figure 1.11 Déplacement de l'aimant par rapport au conducteur et illustration de la loi de Faraday

**Force électromagnétique sur un conducteur** : Lorsqu'un conducteur porteur de courant est placé dans un champ magnétique, il est soumis à une force que nous appelons force électromagnétique, ou force de Lorentz. Cette dernière est subie par une particule chargée dans un champ électromagnétique. C'est la principale manifestation de l'interaction électromagnétique. Cette force, appliquée dans diverses situations, induit l'ensemble des interactions électriques et magnétiques observées. Les effets quantiques affectant la force électromagnétique sont étudiés dans le cadre de l'électrodynamique quantique. La Force de Laplace issue de la force magnétique de Lorentz est d'une importance fondamentale car elle constitue la base de fonctionnement des moteurs, des générateurs et de nombreuses machines électriques. L'amplitude de la force dépend de l'orientation du conducteur par rapport à la direction du champ. La force est maximale lorsque le conducteur est perpendiculaire au champ (Figure 2.12) et nulle lorsqu'elle lui est parallèle.

Il est utile de notifier que les orientations des trois vecteurs, termes de l'équation de Lorentz citée précédemment sont illustrés sur la figure 1.13 qui suit, montrant ainsi ce qui est communément connu sous le nom de la règle des trois doigts de la main droite. Le pouce indique le sens de la force électromagnétique, le majeur l'orientation de l'induction magnétique et l'index le sens du courant.

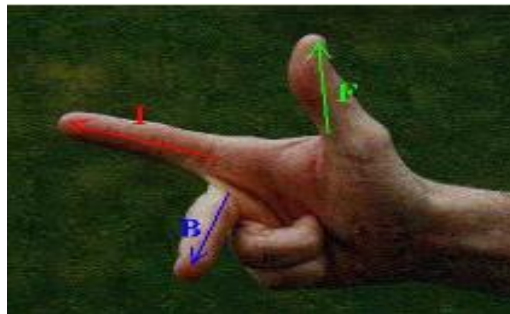


Figure 1.12 La règle des trois doigts

Loi de Laplace : La force électromagnétique, appelée aussi force de Laplace, a pour direction orthogonale au plan formé par la portion de conducteur et le vecteur champ magnétique. Son sens dépend du sens du courant et du sens du champ magnétique de valeur :

$$F = B \cdot l \cdot I \sin \theta \quad (1.6)$$

La valeur de la force électromagnétique en (Nm) est proportionnelle à l'intensité  $I$  du courant, à la longueur ( $l$ ) de l'élément conducteur en (m) et à la valeur  $B$  du champ magnétique en Tesla. L'angle  $\theta$  est celui formé entre la direction du fil conducteur et la direction du vecteur champ magnétique [8].

**Les Rails de Laplace** : On place une tige cylindrique et conductrice sur deux rails, entre les pôles d'un aimant en U. On fait passer un courant dans la tige : elle se déplace. On inverse le sens du courant : elle se déplace en sens inverse. On permute les pôles de l'aimant : elle se déplace en sens inverse. Une portion de circuit électrique parcourue par un courant électrique, placé au voisinage d'un aimant convenablement orienté, est soumise à une force électromagnétique dont le sens dépend du sens du courant (voir figure 1.13).

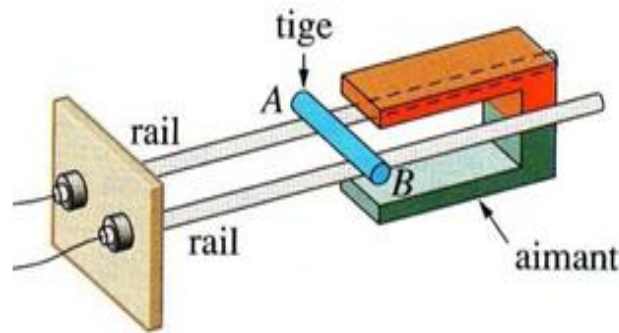


Figure 1.13 Les rails de Laplace

### 1.9- Exercices et leurs résolutions sur le magnétisme [9]

**Exercice 1** (Champ magnétique terrestre) : Un solénoïde comportant  $N = 1000$  spires jointives a pour longueur  $L = 80$  cm. Il est parcouru par un courant d'intensité  $I$ .

- a) Faire un schéma sur lequel vous représenterez :
- le spectre magnétique du solénoïde
  - les faces Nord et Sud
  - le vecteur champ magnétique au centre du solénoïde

On suppose le solénoïde suffisamment long pour être assimilable à un solénoïde de longueur infinie.

- b) Quelle est l'expression de l'intensité du champ magnétique au centre du solénoïde ?

A.N. Calculer  $B$  si  $I = 20$  mA.

L'axe du solénoïde est placé perpendiculairement au plan du méridien magnétique. Au centre du solénoïde on place une petite boussole mobile autour d'un axe vertical.

- c) Quelle est l'orientation de la boussole pour  $I = 0$  ?

Quand le courant d'intensité  $I = 20$  mA parcourt le solénoïde, la boussole tourne d'un angle  $\alpha = 57,5^\circ$ . En déduire l'intensité  $B_h$  de la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

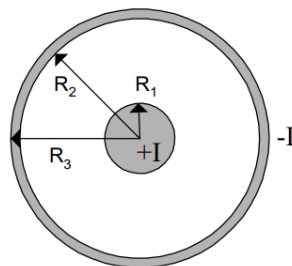
**Exercice 2** (Champ magnétique créé par une spire) : En utilisant la formule de Biot et Savart, déterminer les caractéristiques du champ magnétique créé au centre d'une bobine plate de  $N$  spires, de rayon  $R$  et parcourue par un courant  $I$ .

Application numérique :  $R = 5 \text{ cm}$ ,  $N = 100$  et  $I = 100 \text{ mA}$ .

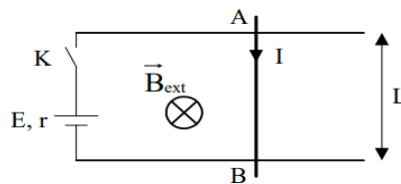
**Exercice 3** (Champ magnétique crée par un câble) : On considère un câble de rayon  $R$ , de longueur infinie, parcouru par un courant d'intensité  $I$  uniformément réparti dans la section du conducteur. A l'aide du théorème d'Ampère, déterminer l'intensité du champ magnétique en un point situé à la distance  $r$  de l'axe du câble.

Tracer la courbe  $B(r)$ .

**Exercice 4** (Champ magnétique crée par un câble coaxial) : On considère un câble coaxial infini cylindrique de rayons  $R_1$ ,  $R_2$  et  $R_3$ . Le courant d'intensité totale  $I$  passe dans un sens dans le conducteur intérieur et revient dans l'autre sens par le conducteur extérieur, comme le montre la figure ci-dessous. Calculer le champ magnétique en tout point. Tracer la courbe  $B(r)$ .



**Exercice 5** (Principe du moteur à courant continu) : A l'instant  $t = 0$ , on ferme l'interrupteur du schéma présenté ci-dessous.



a) Calculer  $I_0$ , le courant circulant dans le circuit à l'instant  $t = 0$ .

b) Déterminer les caractéristiques de la force magnétique s'appliquant sur la barre AB.

Sous l'effet de la force magnétique, la barre est mise en mouvement. A l'instant  $t$ , elle se déplace à la vitesse  $v$ .

c) Déterminer les caractéristiques de la f.é.m. induite. En déduire le courant  $I$  dans le circuit ainsi que le courant induit  $i$ .

En fin d'accélération, la barre atteint une vitesse limite  $v_{\max}$ .

d) Que vaut alors  $F$  ? (En suppose qu'il n'y a pas de frottement). En déduire  $I$ ,  $i$  et  $v_{\max}$ .

**A.N.**  $E = 6 \text{ V}$ ,  $r = 1 \text{ } \Omega$ ,  $B_{\text{ext}} = 1,5 \text{ T}$  et  $L = 20 \text{ cm}$ .

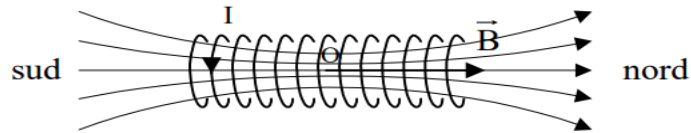
**Exercice 6** (Inductance d'un solénoïde) : Déterminer l'expression de l'inductance  $L$  d'un solénoïde.

A.N.  $N = 1000$  spires ;  $l = 80$  cm ;  $S = 36$  cm<sup>2</sup> , Le solénoïde est traversé par un courant de 0,5 A. Quelle est l'énergie emmagasinée par le solénoïde ?

**Résolution des exercices :**

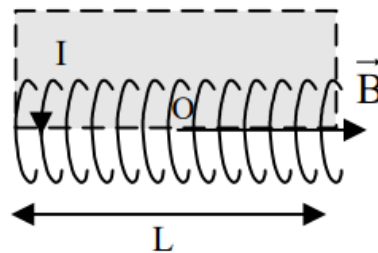
**Exercice 1 :**

a)



Le spectre magnétique d'un solénoïde est semblable à celui d'un aimant droit. On oriente les lignes de champ avec la règle de la main droite (il faut au préalable définir le sens du courant). On en déduit les faces nord et sud du solénoïde. Le champ magnétique au centre du solénoïde est tangent à la ligne de champ passant par O et de sens donné par l'orientation de la ligne de champ.

- b) On suppose qu'à l'intérieur du solénoïde le champ est uniforme et qu'à l'extérieur il est nul. La circulation du champ magnétique le long du contour (C) est :  $C = BL$  (voir figure)  
L'application du théorème d'Ampère donne :  $C = N \cdot \mu_0 \cdot I$



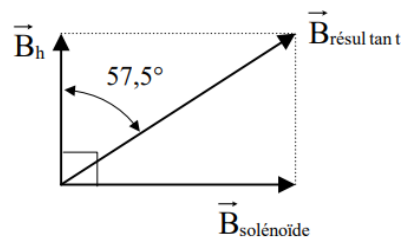
D'où :  $B = \mu_0 \cdot (N/L) \cdot I$  en appliquant numériquement on aura :  $B = 3,1 \cdot 10^{-5}$  T

- c) L'aiguille s'oriente vers le nord magnétique (champ magnétique terrestre).

$$\vec{B}_{\text{résultant}} = \vec{B}_h + \vec{B}_{\text{solénoïde}}$$

$$\tan 57,5^\circ = \frac{B_h}{B_{\text{solénoïde}}}$$

A.N.  $B_h = 2 \cdot 10^{-5}$  T



**Exercice 2 :**

Un morceau de bobine de longueur  $dl$  apporte la contribution :

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{\ell} \wedge \vec{r}}{r^3}$$

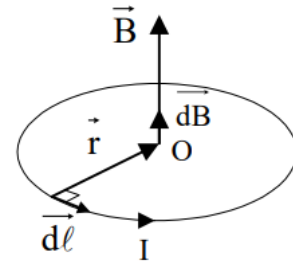
Ce champ élémentaire est dirigé suivant l'axe et son sens dépend du sens du courant (illustré sur figure suivante).

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\ell R}{R^3} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\ell}{R^2}$$

Au totale, la longueur de la bobine est  $N2\pi R$ .

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{N2\pi R}{R^2} = N \frac{\mu_0 I}{2R}$$

A.N.  $B = 0,126 \text{ mT}$



### Exercice 3 :

Le sens du champ magnétique s'obtient avec la règle de la main droite.

- Champ magnétique à l'extérieur du câble ( $r > R$ ) :

Appliquons le théorème d'Ampère avec un contour circulaire (C) centré sur le câble.

La circulation s'écrit :  $C = B 2\pi r$

Théorème d'Ampère :  $C = \mu_0 I$

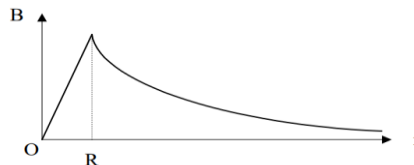
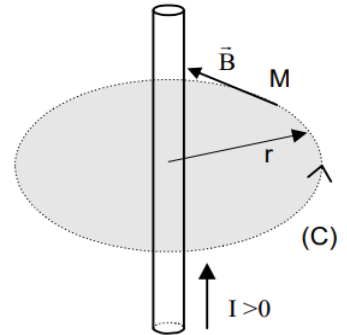
$$\text{D'où : } B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

- Champ magnétique à l'intérieur du câble ( $r \leq R$ ) :

Dans la section de rayon  $r$  passe le courant :  $J = I \frac{\pi r^2}{S} = I \frac{r^2}{R^2}$

$$C = B 2\pi r = \mu_0 J$$

$$\text{D'où : } B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R^2} r$$



### Exercice 4 :

Comme pour l'exercice précédent, on utilise le théorème d'Ampère.

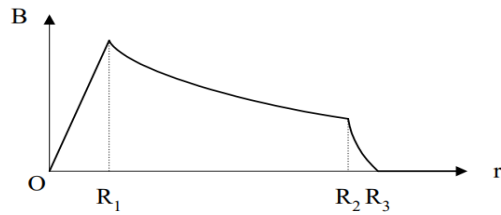
$$\text{Pour } r \leq R_1 : B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R_1^2} r$$

$$R_1 \leq r \leq R_2 : B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

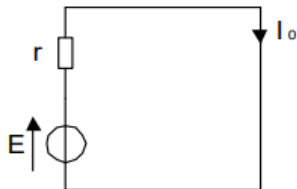
$$R_2 \leq r \leq R_3 : B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \left[ 1 - \frac{r^2 - R_2^2}{R_3^2 - R_2^2} \right]$$

$r \geq R_3 : B = 0$ , un câble coaxial ne crée pas de champ magnétique à l'extérieur.

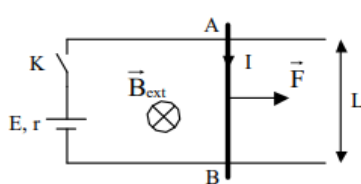


**Exercice 5 :**

a)

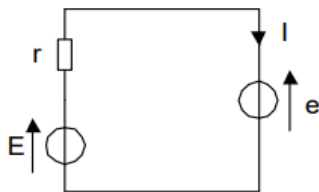


$$\text{Loi d'Ohm : } I_0 = E/r = 6 \text{ A}$$



$$\text{Loi de Laplace : } \vec{F} = I_0 \vec{L} \wedge \vec{B}$$

$$F = I_0 L B = 1,8 \text{ newton}$$

b) fem induite :  $e = BLv$ 

$$I = (E - e)/r = (E - BLv)/r$$

$$I = I_0 - i \quad \text{d'où : } i = e/r = (BLv)/r$$

c)  $F = 0 \text{ N}$  donc  $I = 0$  et  $i = I_0 = E/r = 6 \text{ A}$  $I = 0$  donc  $E = BLv_{\text{max}}$  $v_{\text{max}} = E/(BL) = 20 \text{ m/s}$ **Exercice 6 :**Flux magnétique à travers le solénoïde :  $\Phi = NBS$ Dans un solénoïde  $B = \mu_0 \cdot (N^2/l) \cdot S \cdot I$ ,D'où :  $\Phi = \mu_0 \cdot (N/l) \cdot I$ Par définition :  $L = \Phi/I$  cad  $L = \mu_0 \cdot (N^2/l) \cdot S$ Ce qui revient à dire en appliquant numériquement :  $L = 5,56 \text{ mH}$ L'énergie emmagasinée par le solénoïde est :  $W = 0,5 \cdot L \cdot I^2 = 0,7 \text{ mJ}$

## Chapitre 2 : Machines à courant continu

### 2.1- Introduction

Selon la source d'approvisionnement, les machines électriques sont classées en deux types ; Machine à courant alternatif et machine à courant continu. Par exemple, moteurs à courant continu, générateur de courant continu, etc.

Malgré le développement spectaculaire des machines à courant alternatif, lié aux progrès de l'électronique de puissance, la machine à courant continu garde des domaines d'application où elle demeure la solution la plus économique: On la rencontre dans des applications très diverses, par exemple:

- Moteur de jouet (très faible puissance, alimentation par pile),
- Moteurs d'équipement automobile (démarreur, essuie-glace, ventilateur...),
- Moteur d'entraînement à vitesse variable.
- Moteur universel, favori des équipements électroménagers et du petit outillage est également dérivé d'une machine à courant continu [10].

Qu'est-ce qu'une machine à courant continu ? Une machine à courant continu est un dispositif électromécanique utilisé pour convertir l'énergie électrique en énergie mécanique (cas d'un moteur) ou vice versa (cas d'un générateur). On dit que la machine à courant continu est totalement réversible du fait que pour la même conception, elle peut être utilisée soit comme moteur soit comme générateur. La construction est donc la même pour les deux types de fonctionnement. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique.

### 2.2- Construction d'une machine à courant continu

La machine à courant continu se compose de deux parties principales. Une partie fixe appelée Stator (ou inducteur) et une partie mobile appelée Rotor (ou induit).

Le stator qui est à l'origine de la création du flux magnétique principal, soit par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanents. Il est aussi appelé « inducteur » en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine.

Le rotor bobiné relié à un collecteur rotatif inversant la polarité de chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique. Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits, ou communément « induit » en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine [11].

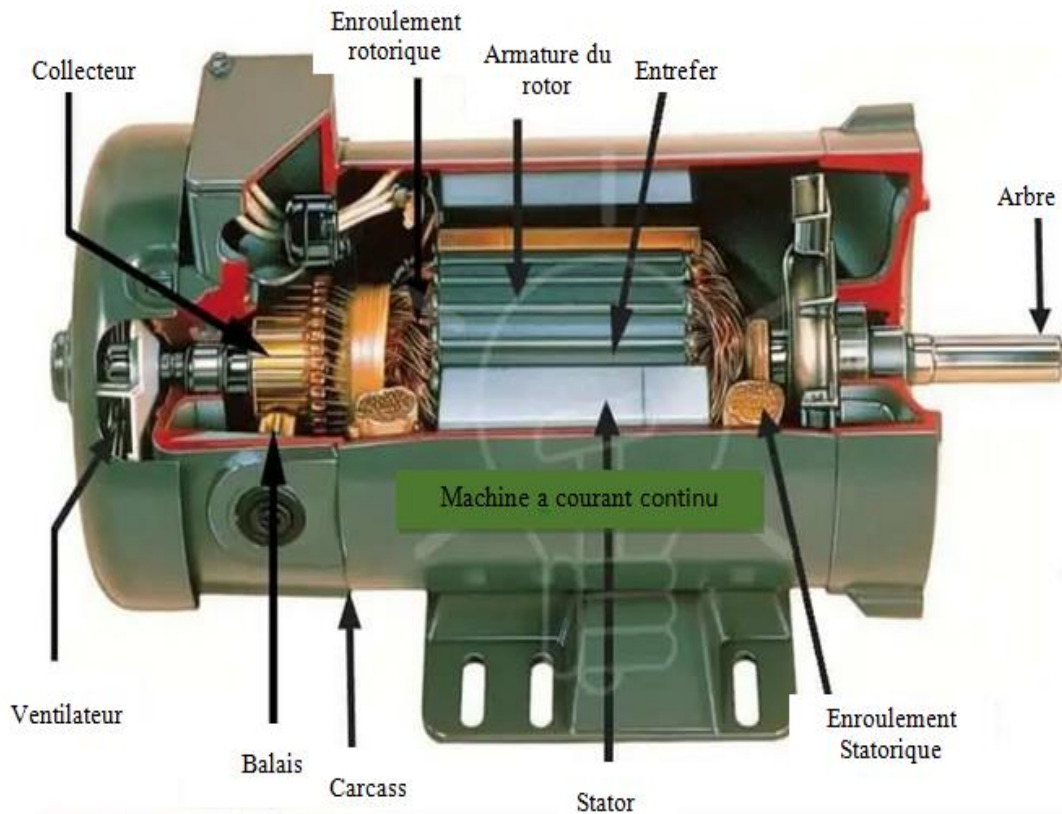


Figure 2.1 Différentes parties constituant une machine électrique tournante à courant continu

La machine à courant continu se compose d'une carcasse, pôles principaux, culasse ou sont fixés les pôles, armature d'induit comportant les enroulements, collecteur, balais avec leur dispositif de fixation dit communément « porte balais » et un arbre. L'explication de chacune des parties avec son rôle sont détaillés ci-dessous.

**Carasse :** Elle protège mécaniquement la machine et la couvre. Généralement fabriqué en fente pour son prix bon marché. La carcasse est fabriquée sous forme ailettes pour agrandir la surface de contact avec l'air afin de favoriser le refroidissement.

**Culasse :** C'est l'armature statorique sur laquelle sont fixés les pôles principaux et auxiliaires comme c'est illustré à la figure 2.2. Elle est fabriquée en tôles d'acier ferromagnétiques minces à faible réluctance, collées les unes aux autres par du vernis ou par un papier isolant spécial afin de limiter la circulation des courant de Foucault et réduire les pertes magnétiques. La culasse est le siège de circulation du champ magnétique principal car elle fournit un chemin à faible réluctance au flux magnétique crée par les pôles.

**Pôles principaux et auxiliaires :** L'enroulement du champ magnétique est placé autour du noyau polaire. Lorsqu'il est parcouru par le courant d'excitation, il crée un champ magnétique et se comporte comme un électroaimant. Du coté orienté vers l'induit l'épanouissement polaire

étend le flux et sert à faciliter le passage du flux magnétique à travers l'entrefer vers l'induit en couvrant la circonférence de ce dernier en épousant sa forme afin de transmettre la quasi-totalité du flux magnétique principal comme c'est montré à la figure 2.3.

Pour réduire les pertes par courants de Foucault, le pôle et ses épanouissements sont composés par des lames d'acier ferromagnétiques minces. Le pôle a pour rôle de créer le champ et produire un flux magnétique à l'intérieur de la machine.

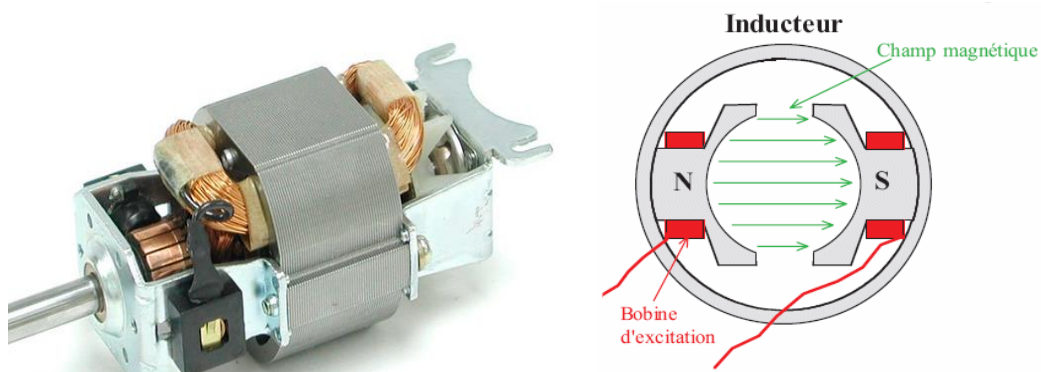


Figure 2.2 Culasse magnétique sur laquelle sont montés les pôles principaux

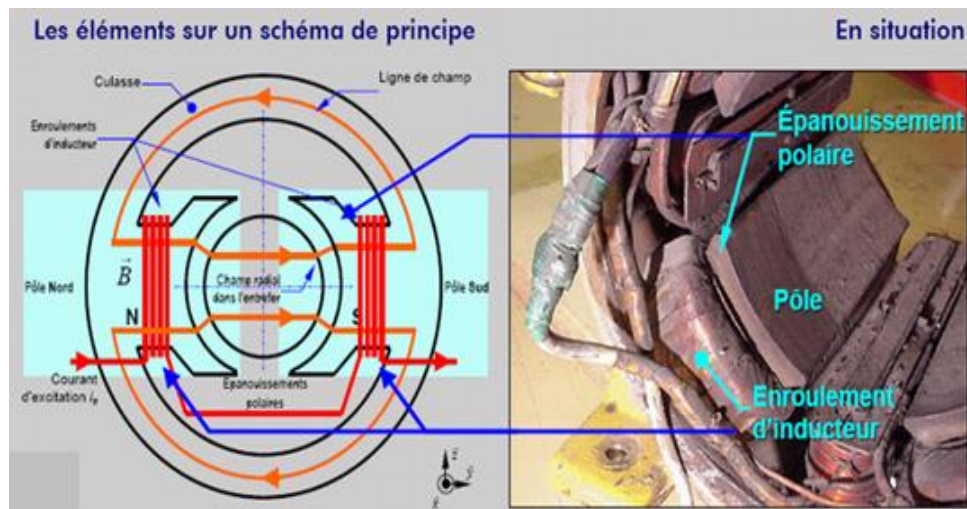


Figure 2.3 Pole principal avec épanouissement polaire [12]

Les pôles auxiliaires sont exactement de même forme que les pôles principaux mais ils sont de dimensions réduites. Leur rôle est d'équilibrer le champ magnétique afin de résoudre le problème de commutation. Cette dernière se traduit par l'apparition des étincelles plus ou moins forme au contact balais-collecteur.

**Enroulement du champ** : C'est l'enroulement polaire appelé aussi circuit d'excitation. Ce dernier est responsable de la création du champ magnétique principal. Une source de courant

continu est utilisée pour exciter l'enroulement du champ. Il est composé de conducteurs de cuivre dans la plupart des cas, mais lorsque le coût est une considération, l'aluminium pourrait le substituer. Lorsque le courant continu traverse la bobine, il génère le champ électromagnétique qui va magnétiser le pôle et produire le flux magnétique. Ce flux produit est directement proportionnel au courant d'excitation. Le flux magnétique doit être bien suffisant pour traverser l'entrefer (l'espace entre les épanouissements polaires et l'induit).

**Armature d'induit** : L'armature dentée de l'induit est de forme cylindrique, reliée à l'arbre par une clavette (voir figure 2.4). C'est donc une partie tournante de la machine à courant continu. Elle se compose d'un certain nombre de fentes sur sa périphérie externe appelées (Encoches) où sont logés les enroulements rotoriques. Elle est composée d'un matériau Ferromagnétique à faible réluctance et à haute perméabilité. L'armature de l'induit est laminée pour réduire les courants de Foucault.

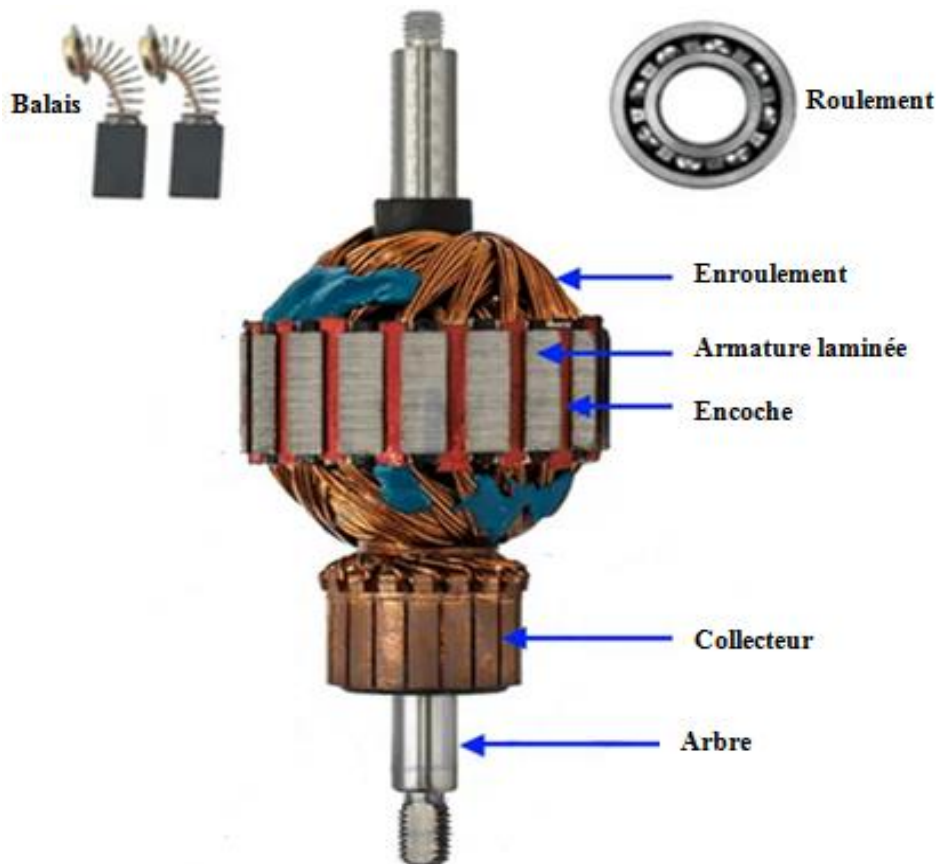


Figure 2.4 Différentes parties constituant l'induit d'une machine électrique à courant continu

**Enroulement d'induit** : L'enroulement d'induit est placé sur les fentes du noyau d'induit. Il est composé de cuivre. L'enroulement d'induit se lie au flux magnétique et induit un flux

magnétique tournant. Selon les connexions, il existe plusieurs modes d'enroulement selon les types de bobinages et selon le cahier de charge dès la conception.

**Le collecteur :** Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine. Les conducteurs d'induit tournent. Le collecteur est utilisé pour connecter les conducteurs de l'enroulement de l'induit rotatif à un circuit externe fixe par l'intermédiaire du système porte balais. Il est composé d'un certain nombre de segments de cuivre dur pour réduire la déchirure et l'usure et résister au frottement des balais fixes. Parce qu'il relie la partie tournante à une partie fixe, tous les segments sont isolés les uns des autres par la fine couche d'isolants en mica, papier ou plastique.

Le collecteur convertit aussi le couple AC en couple DC. Donc, cela fonctionne de la même manière que le redresseur. Ce dernier rôle sera étudié plus en détails ultérieurement.

**Les balais :** Le collecteur connecte les conducteurs du rotor au circuit externe via des balais. Les balais sont utilisés pour transmettre le courant des conducteurs d'induit. Dans la plupart des cas, les balais sont constitués de carbone pour les petites machines et de graphite pour les grandes machines. Les balais sont maintenus en contact avec la surface du collecteur par des portes balais munis de ressorts (voir figure 2.5 ci-dessous).

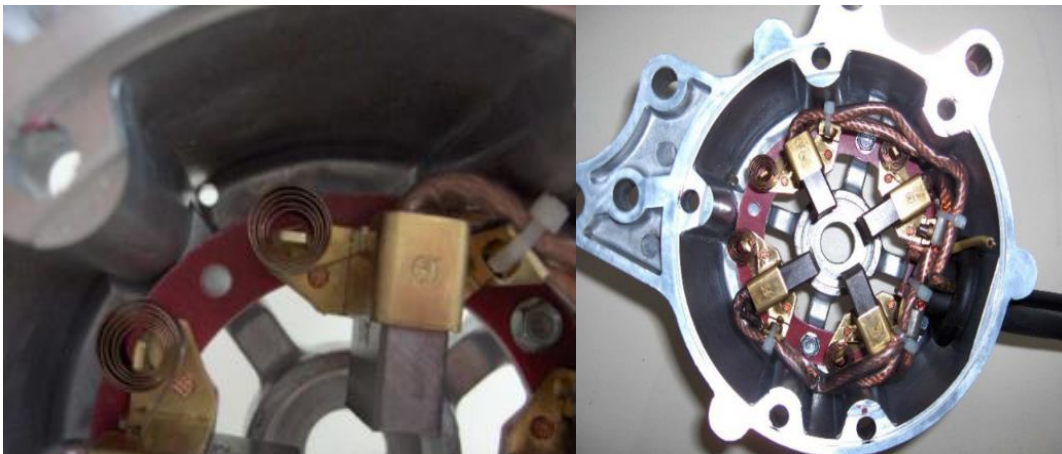


Figure 2.5 Dispositif porte balais monté sur la partie fixe d'une machine électrique à courant continu

**L'arbre :** Sur lequel est montés l'armature dentée de l'induit, le collecteur et les roulements fixés de part et d'autre des bouts de l'arbre. L'arbre est utilisé pour transférer la puissance mécanique à la machine (cas d'un générateur) et si la machine est utilisée comme moteur, il est utilisé pour transférer la puissance mécanique à la charge.

**Les roulements :** Les roulements sont fixés en bout d'arbre. Leur rôle est de réduire le frottement entre la partie tournante et la partie fixe, de fixer l'induit aux paliers afin qu'il puisse tourner aisément et de garder l'espace de l'entrefer constant. Les roulements diffèrent selon la nature du glissement (sec ou humide) et selon leurs types (à billes ou à rouleaux).

### 2.3- Génération de tension alternative (rôle du collecteur)

Aussi peu pertinente que cela puisse paraître, l'étude d'un générateur de courant continu (DC) doit commencer par une connaissance du générateur de courant alternatif (AC). La raison en est que la tension générée dans tout générateur de courant continu est intrinsèquement alternative et ne devient continue qu'après avoir été redressée par le collecteur. La figure 2.6 montre un générateur alternatif élémentaire composé d'une bobine qui tourne à 60 tr/min entre les pôles d'un aimant permanent. La rotation est due à une force motrice externe. La bobine est reliée à deux bagues collectrices montées sur l'arbre. Les bagues collectrices sont reliées à une charge externe au moyen de deux balais fixes.

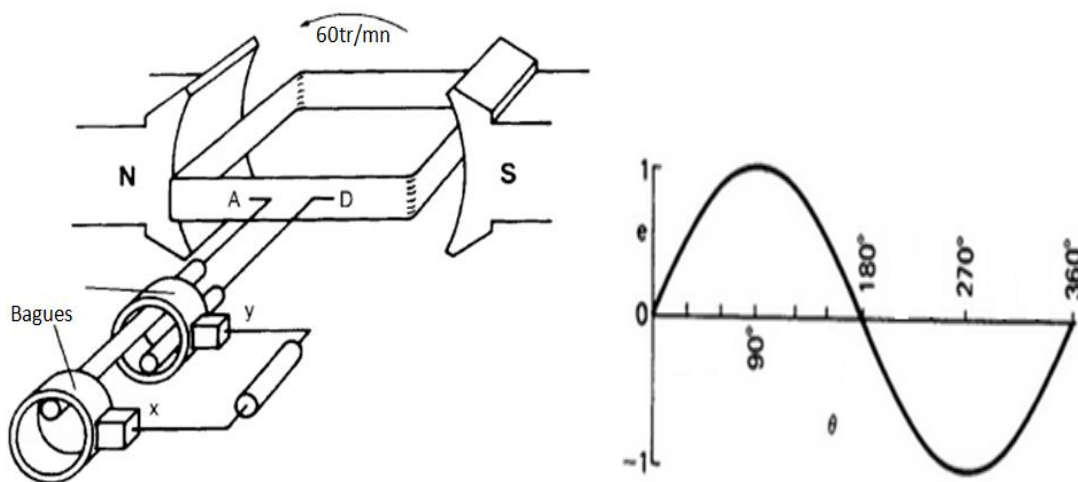


Figure 2.6 Schéma de principe d'un générateur élémentaire à 1 tour par seconde

Lorsque la bobine tourne, une tension est induite entre les bornes A et D. Cette tension apparaît entre les balais x et y. La tension est générée parce que les conducteurs de la bobine coupent les lignes du flux magnétique produit par les pôles N, S. La tension induite est donc maximale lorsque la bobine est momentanément en position horizontale, comme illustré. Aucun flux n'est coupé lorsque la bobine est en position verticale ; la tension cependant est nulle. Mais la tension change de polarité à chaque fois que la bobine fait un demi-tour. La tension peut donc être représentée en fonction de l'angle de rotation (figure 2.6). La forme d'onde dépend de la forme des pôles N, S. La bobine tourne à une vitesse uniforme et comme la bobine fait un tour par seconde, l'angle de 360° de la figure 2.6 correspond à un intervalle d'une seconde. Par conséquent, on peut aussi représenter la courbe de la tension induite en fonction du temps (Figure. 2.6).

Si les balais de la figure 2.6 pouvaient être commutés d'une bague collectrice à l'autre chaque fois que la polarité était sur le point de changer, le balais (x) serait toujours positif et le balais

(y) négatif. On peut obtenir ce résultat en utilisant un collecteur (figure 2.7), qui dans sa forme la plus simple est composée d'une bague collectrice coupée en deux, chaque segment étant isolé de l'autre. Un segment est connecté à l'extrémité de la bobine A et l'autre à l'extrémité de la bobine D. Le collecteur tourne avec la bobine et la tension entre les segments est captée par deux balais fixes x et y. La tension entre les balais pulse mais ne change jamais de polarité (figure. 2.7). La tension alternative dans la bobine est redressée par le collecteur, qui agit comme un inverseur mécanique.

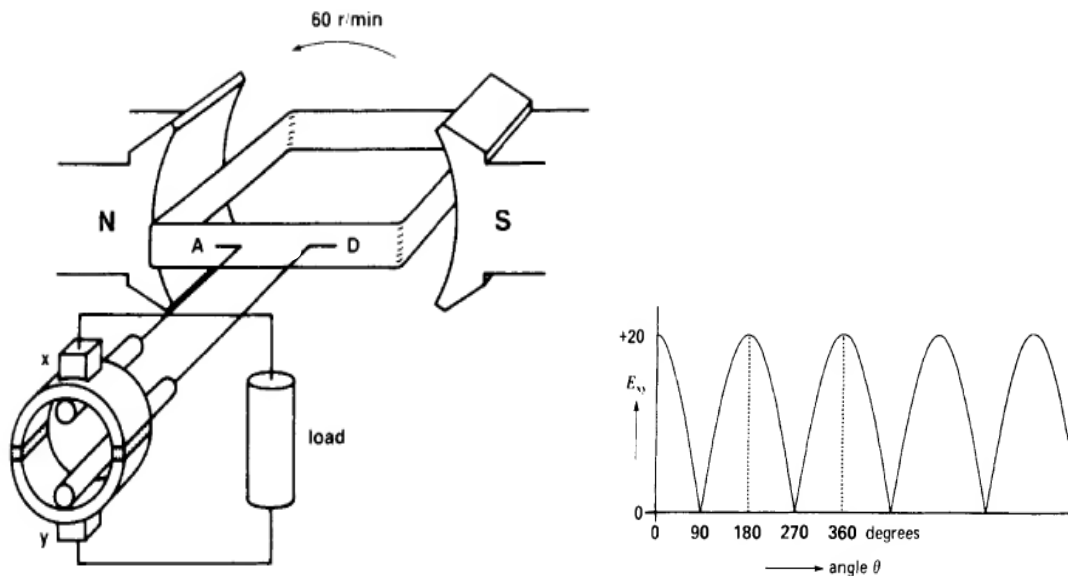


Figure 2.7 Schéma de principe d'un générateur élémentaire à 1 tour par seconde

En raison de la polarité constante entre les balais, le courant dans la charge externe est toujours dans la même direction. La machine représentée à la Figure 2.2 est appelée générateur de courant continu ou dynamo.

Les générateurs élémentaires de courant alternatif et continu des Figure 2.1 et 2.2 sont essentiellement construits de la même manière. Dans chaque cas, une bobine tourne entre les pôles d'un aimant et une tension alternative est induite dans la bobine. Les machines ne diffèrent que par la manière dont les bobines sont connectées au circuit externe. La génération du courant alternatif se fait au niveau des bagues collectrices (Figure 2.8) tandis que les générateurs de courant continu nécessitent un collecteur (Figure 2.9).

Le générateur de courant continu élémentaire produit un courant continu pulsé. Mais, nous pouvons améliorer la tension continue pulsée en utilisant quatre bobines et quatre segments, comme illustré à la figure 2.10 qui montre même la forme d'onde résultante. La tension continue



reste toujours pulsée mais il ne tombe jamais à zéro ; c'est beaucoup plus proche d'une tension continue stabilisée.

En augmentant le nombre de bobines et de segments, on peut obtenir une tension continue très régulière. Les générateurs de courant continu modernes produisent des tensions ayant une ondulation inférieure à 5 %. Les bobines sont logées dans les encoches (fentes) d'un cylindre en acier laminé. Les bobines et l'acier cylindrique constituent l'armature de la machine.

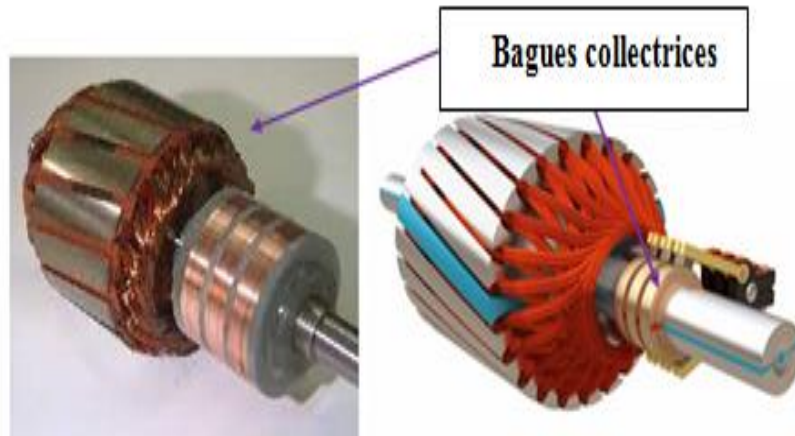


Figure 2.8 Machines asynchrones à rotors bobinés et bagues collectrices sur lesquelles glissent les balais

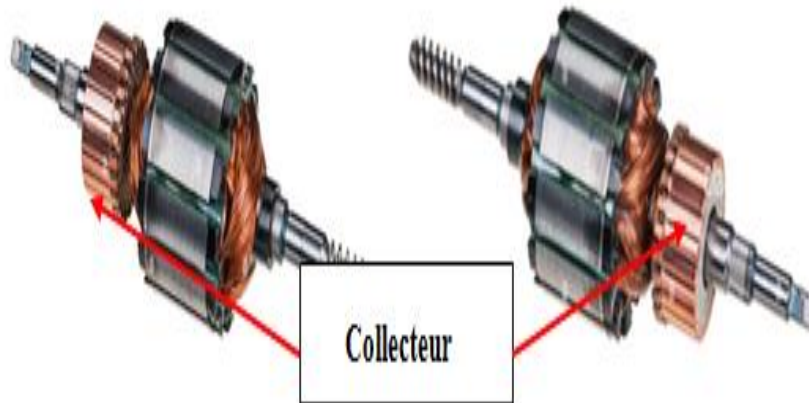


Figure 2.9 Machines à courant continu avec collecteur

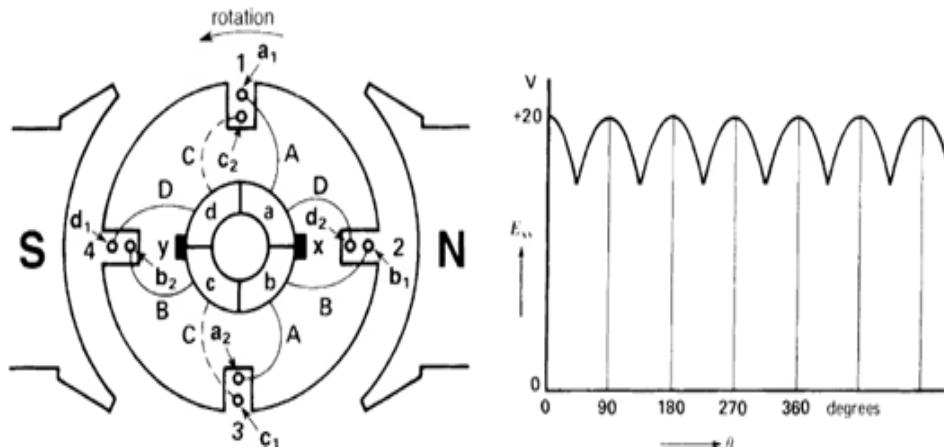


Figure 2.10 Machines à quatre bobines et collecteur à quatre segments ainsi que la résultante de la tension collectée

Si maintenant on considère une armature plus réaliste ayant 12 bobines et 12 encoches au lieu de seulement 4. Lorsque l'armature tourne, la tension  $E$  induite dans chaque conducteur dépend de la densité de flux qu'il coupe. Ce fait est basé sur l'équation de Faraday ( $E=B.l.v$ ).

La tension reste cependant essentiellement constante lorsque l'induit tourne, car le nombre de spires entre les balais est toujours le même, quelle que soit la position de l'induit. La résultante de la tension se rapproche de plus en plus de la forme constante du courant continu. Nous déduisons de ces faits que plus on a de bobines dans les encoches, plus la tension délivrée se confond avec la forme continue. Autrement dit en tenant compte de la réversibilité de la machine électrique « le collecteur ne joue pas seulement le rôle d'intermédiaire électrique entre le réseau extérieur et la machine électrique, mais aussi le rôle de redresseur de courant (cas d'une génératrice) et onduleur (cas d'un moteur).

#### 2.4- Force électromotrice

Nous savons qu'une bobine en mouvement dans un champ magnétique voit 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.  $E$  :

$$E = \frac{p}{2\pi a} \cdot N \cdot \Phi \cdot \Omega ; \quad v \quad (2.1)$$

$p$  : 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)

$\Phi$  Flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)

$\Omega$  vitesse de rotation (en  $\text{rad.s}^{-1}$ )

Avec  $K = (p/2\pi a) \cdot N$  on aura Finalement:  $E = K \cdot \Phi \cdot \Omega$

## 2.5- Principe de fonctionnement, couple et puissance électromagnétique

L'inducteur (ou stator) crée un champ magnétique fixe  $B$ . Ce stator peut être à « aimants permanents » ou constitué d'électro-aimants. L'induit (ou rotor) porte des conducteurs parcourus par un courant continu (alimentation du moteur) ; ces spires, soumises à des forces (forces dites «de Laplace »), entraînent la rotation du rotor. Il en résulte une variation du flux du champ magnétique à travers chaque spire ; elle engendre une f.é.m. qui est « redressée » par l'ensemble {collecteur + balais}. La valeur moyenne  $E$  de cette f.é.m. est proportionnelle à la vitesse angulaire de rotation  $\Omega$  du rotor, au flux maximal du champ magnétique créé par l'inducteur à travers une spire)  $\Phi = S \cdot B$  et à une constante  $K$  qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur (nombre de conducteurs, surface de chaque spire, nombre de paires de pôles,...).

Si l'induit présente une f.é.m.  $E$  alors qu'il est parcouru par un courant d'intensité  $I$ , il reçoit une puissance électromagnétique  $P_{em}$  :  $P_{em} = I \cdot E$ . Le rotor tourne à la vitesse angulaire  $\Omega$  de sorte que cette puissance s'écrit aussi :

$$P_{em} = I \cdot E = T_{em} \cdot \Omega \quad (2.2)$$

Compte tenu de l'expression de la f.é.m.  $E$ , on peut écrire :

$$T_{em} = K \cdot \Phi \cdot I ; \text{ en N.m} \quad (2.3)$$

$K$  est la même constante que dans la formule de la f.é.m.:

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega. \quad (2.4)$$

La Figure 2.11 illustre la force électromotrice et son sens par rapport à l'induction magnétique et au sens du courant dans la spire dans une machine bipolaire

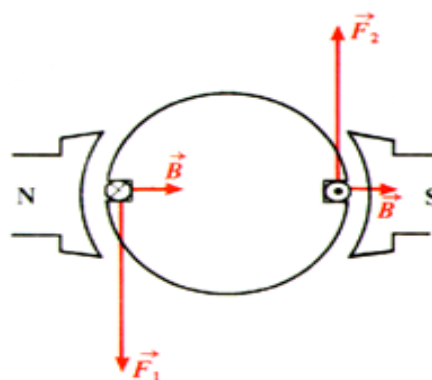


Figure 2.11 Force électromotrice dans une machine bipolaire

## 2.6- Classification des machines à courant continu

Les machines à courant continu peuvent être classées selon leurs modes d'excitation. Rappelons que le circuit d'excitation est celui des pôles principaux, enclins de créer le champ

magnétique principal. Les machines à courant continu sont généralement subdivisées en deux groupes selon la nature de création du champ magnétique. On distingue alors les machines à aimant permanent et les machines à excitation électromagnétique où le champ est créé par une bobine enroulant un noyau ferromagnétique.

On peut réaliser l'excitation électromagnétique de plusieurs façons (excitation indépendante ou auto-excitation tels que l'excitation en série, en parallèle (ou shunt) et composée.

**Machines à excitation indépendante** : Ce type de machine (comme le montre la figure 2.12), est excité séparément, l'enroulement inducteur est électriquement séparé de l'enroulement d'induit. Il n'y a pas de connexion physique entre l'enroulement du champ et l'enroulement d'induit. Dans les machines à excitation indépendante, l'enroulement du champ est alimenté par une source d'alimentation séparée.

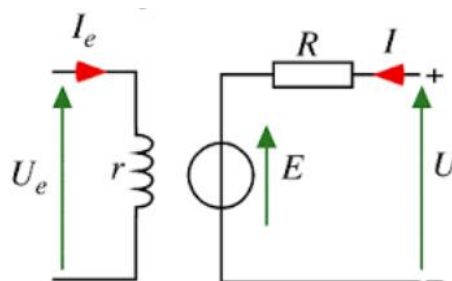


Figure 2.12 : Machine à courant à excitation indépendante

**Machines à auto-excitation** : Dans ce type de machine, l'enroulement de champ et l'enroulement d'induit sont connectés l'un à l'autre. La caractéristique de performance d'une machine dépend de la connexion entre l'enroulement de champ et l'enroulement d'induit. Selon cette connexion entre les deux enroulements, les machines à courant continu sont classées comme ;

- Machine CC bobinée en série
- Machine CC à enroulement shunt
- Machine à courant continu à enroulement composé

**Machines à excitation en série** : Dans ce type de machine à courant continu, l'enroulement de l'inducteur responsable de la création du champ est connecté en série avec l'enroulement d'induit (comme c'est illustré à la figure 2.13). En raison de la connexion en série, la totalité du courant de charge (courant d'induit) passera de l'enroulement de l'inducteur et ce courant est assez élevé. Ainsi, l'enroulement du champ en série est conçu avec un plus petit nombre de tours de fil épais pour réduire la résistance.

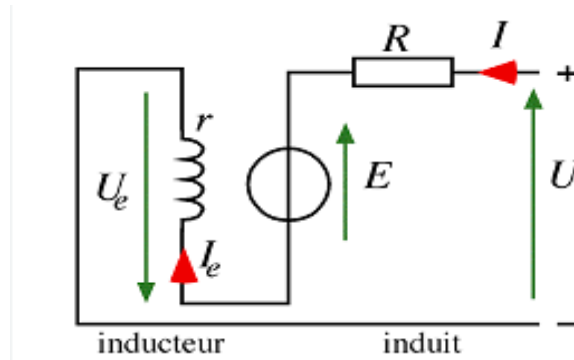


Figure 2.13 : Machine à courant à excitation en série

**Machines à excitation en parallèle (ou shunt) :** Dans ce type de machine à courant continu, l'enroulement de l'inducteur (ou du champ) est connecté en parallèle avec l'enroulement d'induit. En raison de la connexion en parallèle, la pleine tension est appliquée à l'enroulement du champ (voir la figure 2.14). Par conséquent, l'enroulement shunt est conçu avec un grand nombre de spires à haute résistance. Le flux du courant à travers l'enroulement du champ est très faible. Il ne représente que 5 % du courant d'induit nominal.

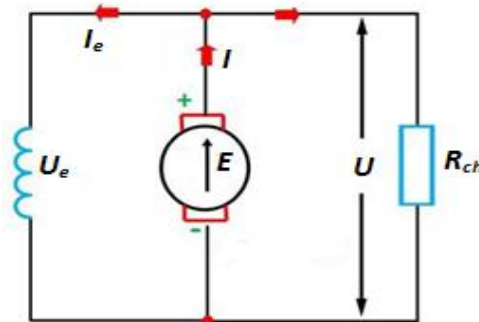


Figure 2.14 : Machine à courant à excitation en parallèle

**Machines à excitation mixte (ou composé) :** Dans ce type de machine à courant continu à bobinage composé, deux enroulements de champ sont utilisés. Un enroulement est connecté en série et le second est connecté en parallèle avec l'enroulement d'induit comme le montre la figure 2.15. L'excitation composée est également classée en deux types; (shunt court et shunt long comme c'est montré à la figure 2.16).

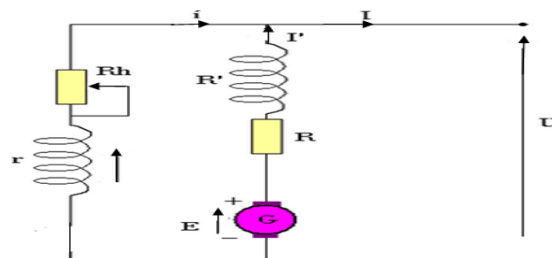


Figure 2.15 : Machine à courant continu à excitation composée

**Court-Shunt** : Si l'enroulement du champ est connecté en parallèle uniquement avec l'enroulement d'induit, la machine est appelée machine à courant continu à enroulement composé shunt court.

**Long shunt** : Si l'enroulement du champ est connecté en parallèle avec une combinaison d'enroulement de champ en série par rapport à l'enroulement d'induit, la machine est appelée machine à courant continu à enroulement composé à long shunt.

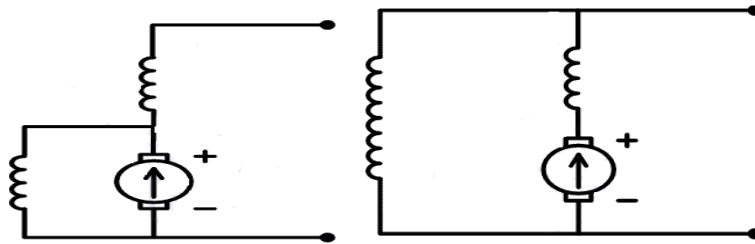


Figure 2.16 : Machine à courant à excitation composée  
A gauche shunt court et à droite shunt long

## 2.7- Applications des machines à courant continu

L'utilisation de l'énergie électrique augmente de jour en jour à cause de la dynamisation industrielle croissante. L'acteur principal de cette révolution est bel et bien les machines électriques qui ne cessent d'évoluer également. Généralement, les machines à courant continu sont utilisées comme excitatrices des alternateurs dans les centrales de production de l'énergie électrique mais elles sont également utilisées dans de nombreuses applications telles que les processus de soudage, les entraînements des moteurs à vitesses variables et les processus d'électrolyse et de galvanoplastie. Les petites machines à courant continu sont utilisées comme dispositif de contrôle tel que la détection de vitesse, le positionnement et le suivi.

### A- Application de la machine à courant continu en tant que moteur

Les moteurs à courant continu sont répartis en trois types ; Moteur série, moteur shunt et composé.

- **Moteur série** : Les moteurs série sont utilisés dans les applications où le couple de démarrage nécessaire est élevé et une possible variation de vitesse. Exemple - Aspirateur, compresseur d'air, grues, système de traction, systèmes d'extraction etc.

- **Moteur shunté** : Le moteur shunt est utilisé dans les applications où le couple de démarrage n'est pas nécessairement élevé et fonctionne à vitesse constante. Exemple - convoyeur, ascenseur, ventilateurs, tour, machine à filer, pompe centrifuge, etc.

- **Moteur composé** : Les moteurs composés sont utilisés dans des applications où un démarrage plus élevé à vitesse constante est requis. Exemples - Laminoirs, ascenseurs, convoyeurs, presses, etc.

### **B- Application de la machine à courant continu comme générateur**

Les générateurs à courant continu sont classés en tant que générateur à excitation séparée, générateur à enroulement shunt et générateur à enroulement série.

- **Générateur à excitation séparée** : Ce type de générateur de courant continu est utilisé pour les tests en laboratoire à cause de sa large gamme d'entrée de tension. Il est également utilisé comme alimentation du moteur à courant continu appelé (système Reynolds).

- **Générateur à excitation shunt** : Ce type de générateur sert à charger les batteries et à fournir une excitation aux alternateurs. Ce type de générateur est également utilisé à des fins d'éclairage.

- **Générateur excitation en série** : Les générateurs à enroulement en série sont utilisés dans les locomotives pour fournir un courant d'excitation du champ ainsi que pour le freinage régénératif. Dans un système de distribution électrique, il est utilisé comme amplificateur.

## **2.8- Générateur à courant continu**

### **2.8.1- Introduction**

Commençons notre étude des machines tournantes avec le générateur de courant continu. Ce dernier n'est plus aussi courant qu'avant, car le courant continu, lorsqu'il est nécessaire, est principalement produit par des redresseurs électroniques. Ces redresseurs peuvent convertir le courant alternatif en courant continu sans utiliser des machines tournantes. Néanmoins, une compréhension des générateurs à courant continu est importante car elle représente une introduction logique au comportement des moteurs. En effet, de nombreuses machines à courant continu dans l'industrie fonctionnent en tant que générateurs. Les machines électriques tournantes à courant continu commercialisées sont construites de la même manière et ils sont réversibles ; par conséquent, n'importe quel générateur de courant continu peut fonctionner comme un moteur et vice versa. En raison de leur construction similaire, les propriétés fondamentales des générateurs et des moteurs sont identiques. Par conséquent, tout ce que nous apprenons sur un générateur de courant continu peut être directement appliqué à un moteur. Dans cette section, nous commencerons par les principes de base d'un générateur à deux pôles lorsqu'il fonctionne à vide. Nous montrerons comment la tension induite est générée et ce qui détermine son amplitude. Ceci est suivi par une étude du comportement du générateur sous

charge. Le couple mécanique, la direction du flux de courant et l'importance de la réaction d'induit seront discutés. Nous discuterons ensuite des principaux types de générateurs de courant continu et de leurs caractéristiques de régulation de tension.

Les machines à courant continu sont essentiellement destinées pour fonctionner en moteur du fait que la génératrice en tant que machine a été totalement remplacée par des dispositifs électroniques statiques réalisant la conversion alternatif-continu (redresseurs). Cependant connaître le fonctionnement en générateur est didactiquement intéressant pour comprendre et maîtriser le fonctionnement en moteur et pour le cas où le moteur accouplé à sa charge, peut parfois, fonctionner en génératrice, (ex : cas d'un train en descente) ou l'engin ralenti grâce au freinage par récupération.

Pour créer une FEM dans une génératrice, il faut deux conditions : La machine doit être entraînée à une vitesse de rotation  $n$  à l'aide d'un moteur primaire ou auxiliaire et l'existence d'un champ magnétisant, donc l'inducteur doit être alimenté.

On a vu précédemment qu'il existe quatre modes d'alimentation de l'inducteur (modes d'excitation) à savoir : excitation indépendante, excitation shunt, excitation série et excitation composée.

Une génératrice est à excitation indépendante (voir figure 2.17 ci-dessous), s'il n'y a aucun lien électrique en l'induit et l'inducteur. Caractéristiques :

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad \text{et} \quad U = E - I \cdot R \quad (2.5)$$

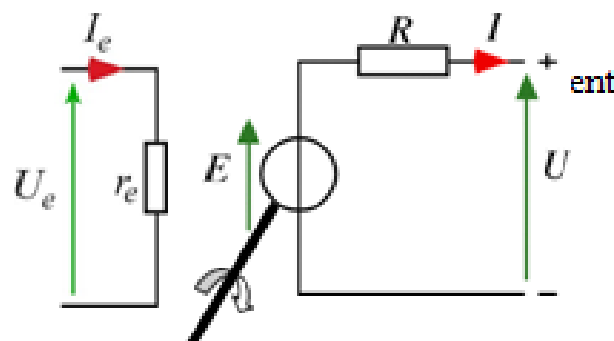


Figure 2.17 : Modèle équivalent d'une génératrice à excitation indépendante

### 2.8.2- Caractéristiques usuelles

Considérons le cas d'une génératrice à excitation indépendante, les variables de fonctionnement sont : La vitesse de rotation ( $n$ ), le courant d'excitation ( $j$ ), la tension aux bornes de l'induit  $U$  et le courant d'induit  $I$ . Il en résulte, les caractéristiques usuelles montrées ci-dessous. Il est à noter que pour les autres modes d'excitation les mêmes caractéristiques peuvent être prélevées et résultent les mêmes allures de courbes mais à des échelles différentes.



**Caractéristiques à vide (ou interne) :**  $E_v=f(\Phi)$  avec à  $\Omega_r$  constante

On réalise le montage selon la figure 2.18 suivant :

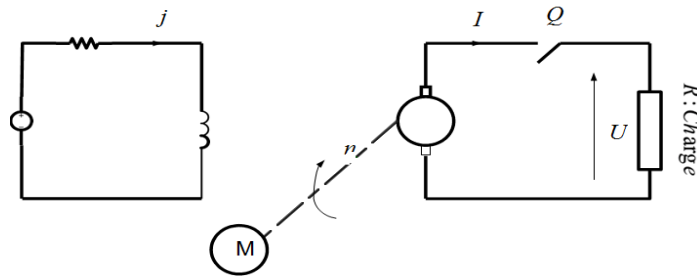


Figure 2.18 : Montage d'essai pour la caractéristique à vide d'une génératrice DC

La machine à courant continu est entraînée par un moteur auxiliaire. On relève la tension à ses bornes quand l'interrupteur est ouvert (essai à vide) et quand il est fermé (essai en charge).

**Essai à vide :** Quand l'interrupteur est ouvert, la machine ne produit aucun courant. On relève la tension pour plusieurs valeurs du courant d'excitation ( $J$ ). On déduit la courbe suivante:

Cette courbe présente les tronçons suivants comme le montre la figure 2.19 suivante):

- ✓ 1ere phase : OA, la caractéristique est linéaire,  $E=K' \Phi$  (avec  $K'=K\Omega$ ).
- ✓ 2eme phase, AB le matériau ferromagnétique dont est constituée la génératrice commence à se saturer. (La perméabilité  $\mu_r$  n'est plus constante).
- ✓ 3eme phase, au-delà de B, le matériau est saturé, le f.é.m. n'augmente plus.

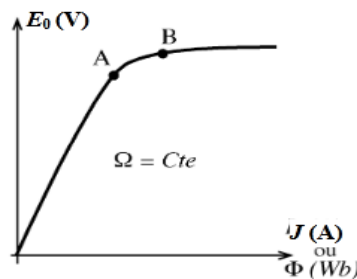


Figure 2.19 : Caractéristique à vide de la génératrice DC

La zone de fonctionnement rationnel de la machine se situe au voisinage du point A. en dessous de ce point, la machine est sous exploitée et au-delà du point B les performances de la machine deviennent limitées et n'augmentent plus contrairement aux pertes du fait que  $J$  augmente.

Du fait que, les pertes magnétiques du matériau ferromagnétique sont généralement faibles, on relève une caractéristique avec une faible hystérésis. Cette courbe est appelée caractéristique à vide. Elle correspond à une vitesse de rotation donnée. Pour un ( $J$ ), une augmentation de la vitesse de rotation entraînera une augmentation de ( $E_0$ ) (voir figure 2.20). On a donc :

$$E_0 = K \cdot \Phi(J) \cdot \Omega \quad (2.6)$$

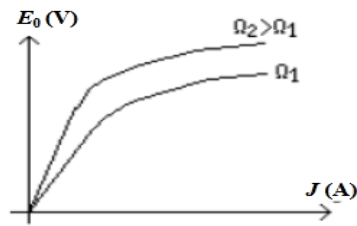


Figure 2.20 : Caractéristiques à vide pour différentes valeurs de vitesse

Remarque : La caractéristique est linéaire tant que la saturation n'est pas atteinte comme c'est illustré sur la figure 2.21 qui suit.

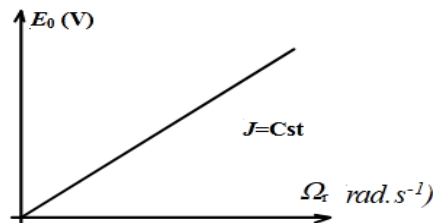


Figure 2.21 Caractéristique linéaire  $E_0$  en fonction de la vitesse pour la phase de non saturation

**Caractéristique en charge :** Pour cette fois-ci, on ferme l'interrupteur du montage de la figure 2.18. La génératrice produit un courant. On prélève de nouveau la tension  $U$  à ses bornes en fonction de  $I$ . La caractéristique (courbe) déduite se place sous la caractéristique à vide précédente (voir la figure 2.22).

L'interprétation de cette différence s'explique par deux phénomènes: le premier est la chute de tension dans les conducteurs de l'induit représentée par une résistance  $R$  :  $\Delta U = R \cdot I$  ; le deuxième phénomène est due par ce qu'on appelle « la réaction magnétique d'induit (RMI) ». Cette dernière est explicable par le fait que le courant d'induit, qui résulte du déplacement du rotor sous le flux créé par l'inducteur va, lui aussi, créer un flux qui va interagir avec le flux magnétique principal de l'inducteur et va s'opposer à celui qui lui a donné naissance. Il va donc le déformer, ce qui se traduit par une chute de tension supplémentaire. En charge, le système va donc fonctionner sous un flux inférieur à celui créé par l'inducteur ( $\Phi_{ch}(J, I) < \Phi_0(J)$ ), d'où une tension plus faible. La tension de sortie de la machine s'écrit alors :

$$U = K \cdot \Phi(J, I) \cdot \Omega - R \cdot I = E_c - R \cdot I \quad (2.7)$$

$$E_c < E_0 \quad (E_0 - E_c) = \varepsilon \quad (2.8)$$

$\varepsilon$  : Est la chute de tension due à la réaction magnétique d'induit RMI

La chute de tension totale est alors notée  $U(I) = \varepsilon + R \cdot I = E_0 - U$

Remarques: La saturation de l'induit augmente l'effet de la RMI. Pour annuler la réaction magnétique d'induit, la machine est dotée sur le stator des enroulements de compensation parcourus par le courant d'induit : on dit que la machine est compensée.

**Caractéristique de réglage  $J=f(I)$  à  $U$  et  $N_r$  constants :** En charge, pour maintenir la tension  $U$  constante il faut augmenter  $E_0$  qui est égale à  $U+\Delta U$  au fur et à mesure que  $I$  croît cela implique qu'on doit agir sur le courant d'excitation  $J$  (courbe allée). Si on refait le chemin inverse, c'est à dire diminuer  $I$ , la tension  $U$  augmente il faut donc diminuer  $J$  (courbe de retour).

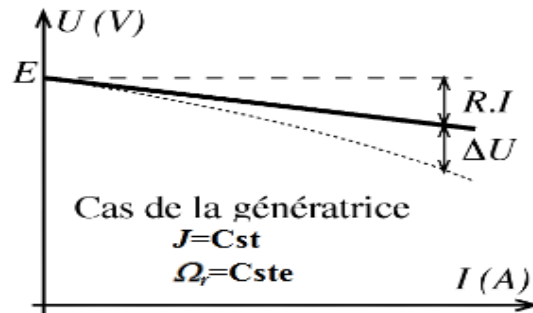


Figure 2.22 Caractéristique en charge de la génératrice DC

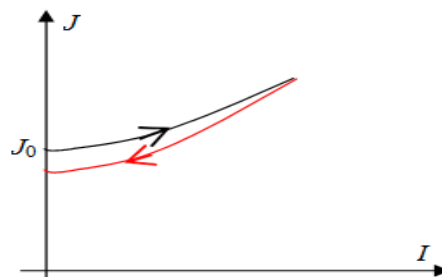


Figure 2.23 Caractéristique de réglage d'une génératrice DC

## 2.9- Moteur à courant continu

### 2.9.1- Principe de fonctionnement

Lorsque l'inducteur est alimenté, il crée un champ magnétique (flux d'excitation) dans l'entrefer, dirigé suivant les rayons de l'induit. Ce champ magnétique traverse l'induit du côté du pôle Nord de l'inducteur et quitte l'induit du côté du pôle Sud de l'inducteur, comme c'est illustré à la figure 2.18.

Quand l'induit est alimenté, ses conducteurs situés sous un même pôle inducteur (d'un même côté des balais) sont parcourus par des courants de même sens et sont donc, d'après la loi de Laplace, soumis à une force. Les conducteurs situés sous l'autre pôle sont soumis à une force de même intensité et de sens opposé. Les deux forces créent un couple qui fait tourner l'induit du moteur.

Lorsque l'induit du moteur est alimenté par une tension continue  $U$ , il produit une force contre-électromotrice  $E$  dont la valeur est :

$$E = U - RI \quad (2.9)$$

$RI$  représente la chute de tension dans l'induit. La force contre-électromotrice  $E$  est liée à la vitesse et à l'excitation par la relation :

$$E = k \Omega \Phi \quad (2.10)$$

Dans laquelle :  $k$  est une constante propre au moteur,  $\Omega$  : la vitesse angulaire et  $\Phi$  est le flux magnétique. Cette relation montre qu'à excitation constante la force contre-électromotrice  $E$ , proportionnelle à  $\Omega$ , est une image de la vitesse. Le couple est lié au flux inducteur et au courant dans l'induit par la relation suivante et selon laquelle, en réduisant le flux, le couple diminue :

$$C = k \Phi I \quad (2.11)$$

Deux méthodes permettent d'augmenter la vitesse : Soit croître la force contre-électromotrice  $E$ , donc la tension d'alimentation à excitation constante : c'est le fonctionnement dit « à couple constant » ; Soit décroître le flux d'excitation, donc le courant d'excitation, en maintenant la tension d'alimentation constante : c'est le fonctionnement dit en régime « défluxé » ou « à puissance constante ». Ce fonctionnement impose que le couple soit décroissant avec l'augmentation de vitesse (voir figure 2.24).

Le fonctionnement du moteur à courant continu est réversible : si la charge s'oppose au mouvement de rotation (charge dite résistante), l'appareil fournit un couple et fonctionne en moteur ; si la charge est telle qu'elle tend à faire tourner l'appareil (charge dite entraînée), l'appareil fournit de l'énergie électrique et fonctionne en génératrice.

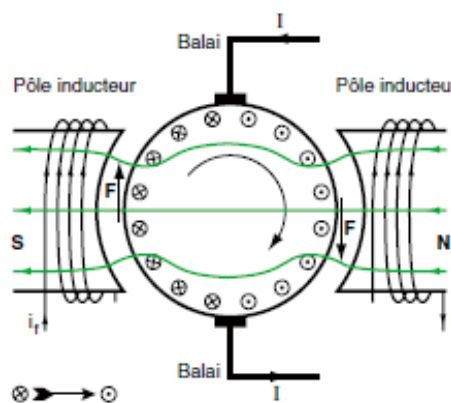


Figure 2.24 Production du couple dans un moteur DC

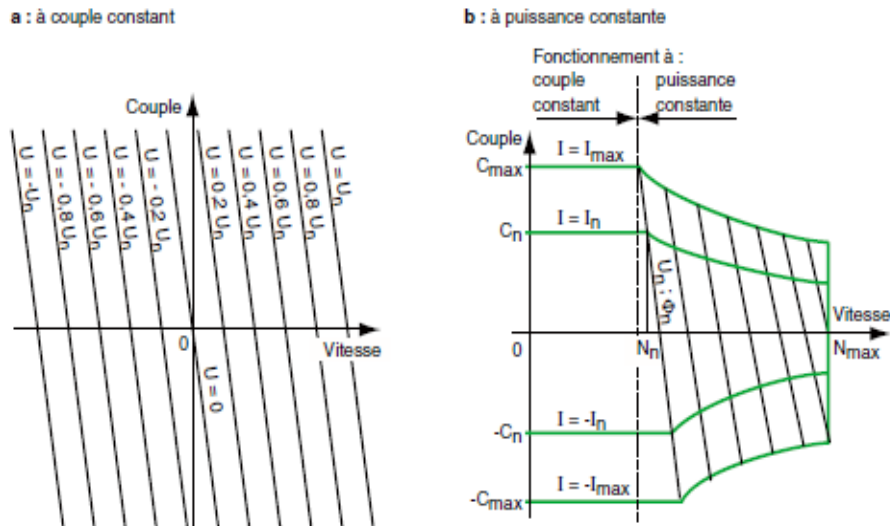


Figure 2.25 Courbes couple/vitesse d'un moteur DC à excitation séparée

Le moteur à courant continu est plus coûteux que celui à courant alternatif usuel, son entretien est plus exigeant et son usage est restreint car le réseau de distribution de l'énergie électrique est à courant alternatif. Son avantage réside dans le contrôle et la variation de sa vitesse ; donc son atout majeur est l'entraînement à vitesse variable.

### 2.9.2- Différents types de moteurs à courant continu

**A excitation parallèle (ou shunt) :** Comme le montre la figure 2.26, les bobines de l'induit et de l'inducteur, sont connectées en parallèle ou alimentés par deux sources de tensions différentes pour des questions d'adaptation aux caractéristiques de la machine (ex.: tension d'induit 220 volts et tension d'inducteur 110 volts)

L'inversion du sens de l'un ou de l'autre des enroulements entraîne l'inversion du sens de rotation. La majorité des variateurs bidirectionnels pour le moteur à courant continu est souvent du côté de l'induit.

**A excitation série :** Ce moteur est de construction semblable à celle du moteur à excitation indépendante. Le bobinage inducteur est connecté en série avec le bobinage induit, d'où son appellation.

L'inversion du sens de rotation est obtenue indifféremment par inversion des polarités de l'induit ou de l'inducteur. Ce moteur est essentiellement utilisé en traction, en particulier sur les chariots alimentés par batteries d'accumulateurs. En traction ferroviaire les anciennes motrices du TGV utilisaient ce type de moteur, les plus récentes utilisent des moteurs synchrones.

**A excitation composée (ou compound) :** Ce moteur permet de réunir les qualités du moteur à excitation série et du moteur à excitation parallèle. Il comporte deux enroulements par pôle

inducteur. L'un est en parallèle avec l'induit. Il est parcouru par un faible courant au regard du courant de travail; L'autre est en série. Le moteur est à flux additif si les ampères-tours des deux enroulements s'ajoutent avec leurs effets. Il est à flux soustractif dans le cas contraire, mais ce mode de montage est très rarement utilisé au vu de son fonctionnement instable pour les grandes charges.

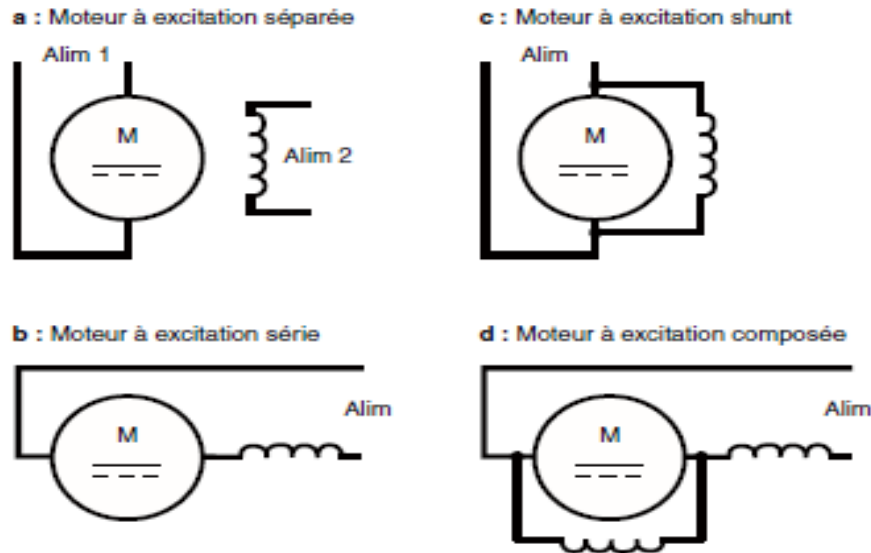


Figure 2.26 Schémas des différents types d'excitation des moteurs DC

### 2.9.3- Rappel des relations

#### 2.9.3.1- Equation de la force contre électromotrice FCEM

Le schéma équivalent du moteur à courant continu est illustré sur la figure 2.27 suivante :

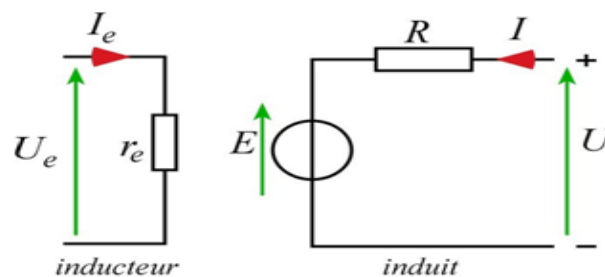


Figure 2.27 Circuit équivalent d'un moteur DC à excitation indépendante

$$E = \frac{p}{2\pi\alpha} \cdot n \cdot \Omega \cdot \Phi = K \cdot \Omega \cdot \Phi \quad (2.12)$$

$p$  : étant le nombre de paires de pôles ;

$\alpha$  : le nombre de paires de voies d'enroulement

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

$\Phi$  Flux maximum à travers les spires (en Webers - Wb)

$\Omega$  vitesse de rotation (en rad.  $s^{-1}$ )

### 2.9.3.2- Equation des couples

Il est nécessaire dans cette section d'énumérer les différents couples entrant en jeu lors de la conversion électromagnétique. On les cite l'un après l'autre et au final on les réunira dans une seule expression.

**Couple électromagnétique :** S'exerçant entre le rotor et le stator, plus précisément dans la zone d'entrefer. Cette dernière malgré son exigüité, est le siège de l'interaction magnétique des champs statorique et rotorique.

$$T_{ém} = \frac{P_{ém}}{\Omega_r} = \frac{E_{ém}}{\Omega_r} \cdot I \quad (2.13)$$

Compte tenu de l'expression de la f.é.m. E, on peut écrire :  $T_{ém} = K \cdot \Phi \cdot I$  ; en N.m, K est la même constante que dans la formule de la f.é.m.:  $E_{ém} = K \cdot \Phi \cdot \Omega_r$ .

**Couple utile sur l'arbre du moteur :** Le couple utile est égal au couple électromagnétique moins le couple à vide. Ce dernier est dû à la composante des pertes dans le fer et des pertes magnétiques.

$$T_u = T_{ém} - T_0 \quad \text{avec } T_0 = (P_{fer} + P_{méc}) / \Omega_0 \quad (2.14)$$

Il est intéressant de remarquer que toute relation entre des puissances peut être ramenée à une relation entre des couples. Il suffit de diviser cette première par la vitesse de rotation  $\Omega$  (en rad. s<sup>-1</sup>).

**Couple à vide :** suit aussi cette règle. L'expression des pertes correspondantes au produit du couple à vide par la vitesse à vide.

$$T_0 = \frac{P_c}{\Omega_0} \quad ; \text{ N.m} \quad \text{Notons que } P_c = P_{méc} + P_{fer} \quad (2.15)$$

**Couple de charge :** le couple de charge dépend uniquement de la charge que doit supporter le moteur, on le désignera désormais par ( $T_{ch}$ ).

Ainsi on peut déduire l'expression finale des couples :  $T_{ém} \geq T_{ch} + T_0$  ; On définit Les différentes pertes dans un moteur électrique à courant continu comme suit :

**Pertes constantes ( $P_c$ ):** On les appelle aussi les pertes à vide ou collectives (voir tableau 2.1). C'est à dire que si le moteur travaille à vitesse et flux constants, les pertes fer et mécaniques sont approximativement constantes. Les pertes à vide sont la somme des pertes mécaniques (dues aux frottements aux balais, aux paliers et frottement sur l'air) et les pertes dans le fer (principalement les pertes dues au phénomène d'hystérésis et aux courants de Foucault).

**Pertes joule ( $P_j$ ) :** Ce sont les pertes dégagées et dissipées dans l'espace environnant sous forme de chaleur par effet Joule. Ces pertes se produisent dans le cuivre de l'inducteur et l'induit. Si

ces dernières dépassent un seuil d'échauffement inadmissible, le moteur doit être dans ce cas muni d'un ventilateur en bout d'arbre pour le refroidir sinon, des matières isolantes entre les conducteurs tel que le vernis fond, en produisant des court-circuit conduisant à l'arrêt définitif de la machine.

Rappelons que selon Joule un courant ( $I$ ) parcourant une matière conductrice de résistance ( $R$ ) pendant un temps ( $t$ ) dégage une chaleur ( $Q$ ) correspondante à :

$$Q = R I^2 t \quad ; \quad (2.16)$$

Tableau 2.1 Les pertes dans une machine électrique

| Pertes  | Pertes dans le fer<br>$P_f$   | Pertes joule<br>$P_j$   | Pertes mécaniques<br>$P_{méca}$                                   |
|---------|---|---|---|
| Causes  | Elles sont dues à l'hystérésis (champ rémanent) et aux courants de Foucault (courant induit dans le fer) et dépendent de $B$ et de $\Omega$ . | Pertes dans l'induit ( $R.I^2$ ) et l'inducteur ( $r_e.J^2$ ) dues aux résistances des bobinages. | Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement. |
| Parades | Utilisation de matériaux à cycles étroits, comme le fer au silicium et le feuilletage de l'induit.  | Il faut surtout éviter l'échauffement par ventilation.  | Utilisation de roulements et de lubrifiants.                      |

### 2.9.3.3- Bilan énergétique et rendement

Du fait que le moteur convertit l'énergie électrique en énergie mécanique les pertes joules sont les premières à se dissiper dans l'espace environnant sous forme de chaleur. Ces pertes par effet joule sont les pertes dans le cuivre de l'induit et l'inducteur.

Les pertes dans le fer (pertes d'Hystérésis et pertes dues par les courants de Foucault), suivent la création de la puissance et le couple électromagnétique. Les pertes mécaniques qui sont en général les pertes dues aux frottements aux balais, aux paliers et frottement sur l'air, sont les dernières à se soustraire de l'énergie fournie avant que le moteur délivre son couple mécanique. Le bilan de puissance tel qu'il a été présenté est montré à la figure 2.28 suivante.

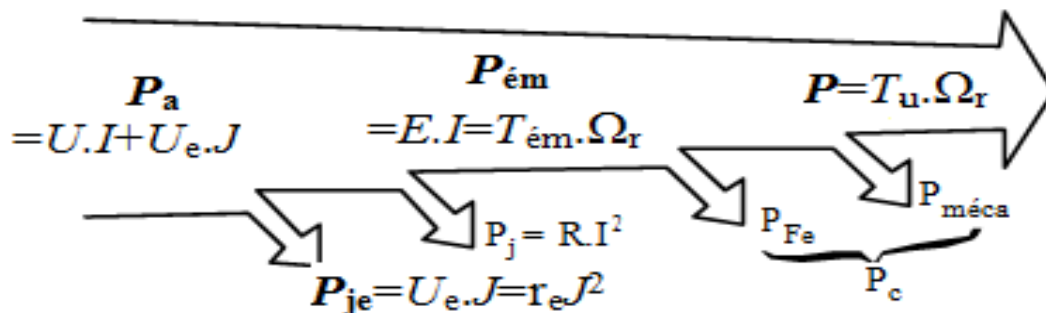


Figure 2.28 Schémas du bilan énergétique d'un moteur DC



Tableau 2.2 Récapitulation des pertes selon l'arbre énergétique

|           |                                     |            |  |
|-----------|-------------------------------------|------------|--|
| $P_a$     | Puissance absorbée (W)              | $U_e$      | Tension de l'inducteur (V)                 |
| $P_{ém}$  | Puissance électromagnétique (W ;    | $E$        | F.é.m. (V)                                 |
| $P_u$     | Puissance utile (W)                 | $I$        | Courant d'induit (A)                       |
| $P_{je}$  | Pertes joules à l'inducteur (W)     | $T_{ém}$   | Couple électromagnétique (N.m)             |
| $P_j$     | Pertes joules à l'induit (W)        | $P_{méca}$ | Pertes mécaniques (W)                      |
| $P_{fer}$ | Pertes ferromagnétiques (W)         | $R$        | Résistance d'induit ( $\Omega$ )           |
| $T_u$     | Couple utile (N.m)                  | $\Omega$   | Vitesse de rotation (rad.s <sup>-1</sup> ) |
| $R_e$     | Résistance d'inducteur ( $\Omega$ ) | $J$        | Courant d'inducteur (A)                    |

**Remarque :** Toute l'énergie absorbée par l'inducteur et dissipée par effet joule. On peut omettre l'inducteur dans le bilan des puissances et alors  $P_{je}$  n'apparaît pas et  $P_a=U.I$ .

Les pertes fer et les pertes mécaniques sont rarement dissociées, la somme étant les pertes constantes à vide  $P_c$ .

Si le moteur est à aimants permanents,  $U_e$ ,  $J$  et  $P_{je}$  n'existent pas.

Le rendement : C'est le rapport entre la puissance fournie et celle utile.

$$\eta = P_a/P_u \quad (2.17)$$

Comme  $P_u=P_a - \Sigma \text{Pertes}$  nous pouvons écrire que :

$$\eta = 1 - \frac{\Sigma \text{Pertes}}{P_a} \quad (2.18)$$

## 2.9.4- Moteur à excitation indépendante

### 2.9.4.1- Caractéristiques générales

En consultant le schéma du circuit équivalent d'un moteur à courant continu (voir figure 2.29), on déduit que la loi d'Ohm est facilement applicable :  $U=E+RI$  (2.19)

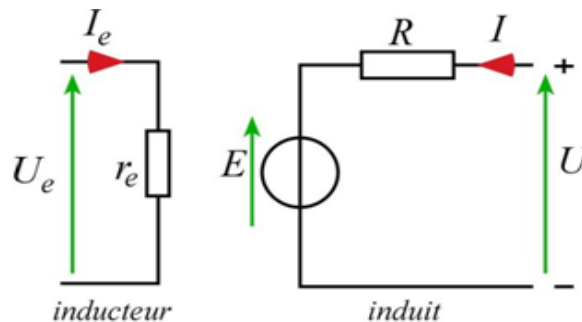


Figure 2.29 Schémas du circuit équivalent d'un moteur à courant continu

Vitesse et sens de rotation : Le sens de rotation est influencé d'un côté par le sens du flux, donc par sens du courant d'excitation  $J$  et d'un autre coté par le sens du courant d'induit  $I$ .

$$\Omega r = \frac{E}{K \cdot \Phi} = \frac{U - RI}{K \cdot \Phi} \quad (2.20)$$

**Fonctionnement à vide** : A vide la seule puissance absorbée sert à compenser les pertes. La puissance utile est nulle. Le fonctionnement à vide est utile pour déterminer les paramètres équivalents du circuit magnétique ainsi que les pertes à vide. Comme on l'a annoncé précédemment ces dernières dépendent des pertes mécaniques et pertes dans le fer du circuit magnétique.

Le courant à vide  $I_0$  est trop petit comparé au courant du service nominal  $I_n$  ce qui nous ramène à négliger la chute de tension de l'induit  $(R \cdot I_0) \ll U$ . l'équation de la vitesse à vide pourra être exprimée par :

$$\Omega_0 = \frac{E}{K \cdot \Phi} = \frac{U - RI_0}{K \cdot \Phi} \cong \frac{U}{K \cdot \Phi} \quad (2.21)$$

La vitesse à vide se règle en fonction de la tension d'alimentation et du flux inducteur  $\Phi$ .

NB : A vide, Lorsque l'induit est sous tension, Il ne faut jamais supprimer le courant d'excitation ( $I_{exc}$ ), le moteur peut s'emballer conformément à l'équation précédente. En effet si  $I_{exc}$  tend vers 0 alors  $\Phi$  tend vers 0 et  $\Omega_0$  tend vers  $\infty$ . Si  $\Phi$  tend vers 0, une autre possibilité est envisageable ; le couple électromagnétique tend aussi vers 0 et il arrivera un moment où le couple sera inférieur au couple résistant et la machine s'arrêtera. Fonctionnement à flux constant

Au vu de sa linéarité, comme le montre l'expression mathématique ci-dessous ; sa caractéristique passe approximativement par zéro comme le montre la figure 2.30.

$$\Omega_0 = \frac{E}{K \cdot \Phi} = \frac{U - RI_0}{K \cdot \Phi} \cong \frac{U}{K \cdot \Phi} = K_2 \cdot U \quad (2.22)$$

Avec :

$$K_2 = \frac{1}{K \cdot \Phi}$$

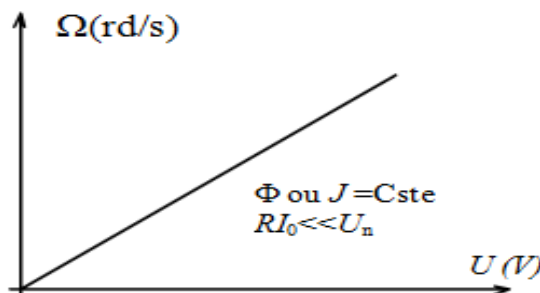


Figure 2.30 Caractéristique à vide à flux constant d'un moteur DC

Fonctionnement en charge La vitesse de rotation en fonction de la tension d'alimentation s'exprime comme suit :

$$\Omega = \frac{E}{K.\Phi} = \frac{U - RI}{K.\Phi} = K_2 \cdot (U - RI) \quad (2.23)$$

Avec :

$$K_2 = \frac{1}{K.\Phi} = \text{cte} \quad (2.24)$$

On remarque facilement selon ces équations que la vitesse dépend d'un côté de la tension d'alimentation  $U$  et d'un autre côté de l'intensité du courant  $I$  imposée par le moment du couple résistant (voir figure 2.31).

La tension d'alimentation reste tout de même grande comparée à la chute de tension de l'induit ( $R.I$ ). En conséquence la vitesse de rotation est essentiellement fixée par la tension d'alimentation  $U$  et varie très peu en fonction de la charge, c'est-à-dire du courant.

Exprimons maintenant le courant en fonction du couple utile :

$$I = \frac{C_{em}}{K.\Phi} = \frac{C_u - C_p}{K.\Phi} \quad (2.25)$$

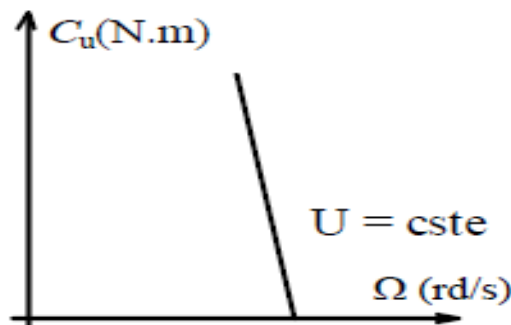


Figure 2.31 Caractéristique mécanique du moteur DC

Le couple de perte  $C_p$  reste constant et faible devant le couple de charge  $C_r$

Si on admet que les pertes mécaniques et les pertes fer sont proportionnelles à la vitesse de rotation alors le couple des pertes est constant.

$$C_p = \frac{P_{fer} + P_{méc}}{\Omega_r} \quad (2.26)$$

Avec :

$$P_{méc} = K_1 \cdot \Omega \quad ; \quad P_{fer} = K_2 \cdot \Omega \quad (2.27)$$

$$\frac{(P_{méc} + P_{fer})}{\Omega} = K_1 + K_2 = K_3 = \text{Cte} \quad (2.28)$$

On déduit finalement que :

$$C_u = C_{méc} - K_3$$

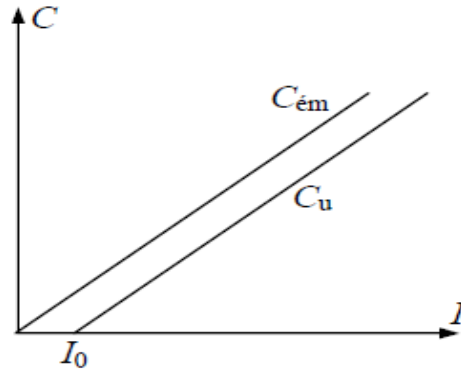


Figure 2.32 Caractéristique des couples du moteur DC

En conclusion, après avoir mis en exergue les différentes caractéristiques que le mode de fonctionnement usuel avec alimentation de l'induit sous tension réglable permet d'avoir une vitesse progressive sans surintensité dans un large intervalle. C'est le mode de fonctionnement utilisé lorsqu'on aura besoin de varier fréquemment la vitesse. On conclut aussi que la tension d'alimentation donnée impose la vitesse de rotation prédéterminée et la charge impose aussi la valeur du courant.

**Point de fonctionnement :** La charge impose au moteur un couple résistant  $C_r$ , et pour que ce moteur puisse entraîner cette charge, le moteur doit fournir un couple utile  $C_u$  de telle façon que :  $C_r \geq C_u$ . Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur (voir figure 2.33).

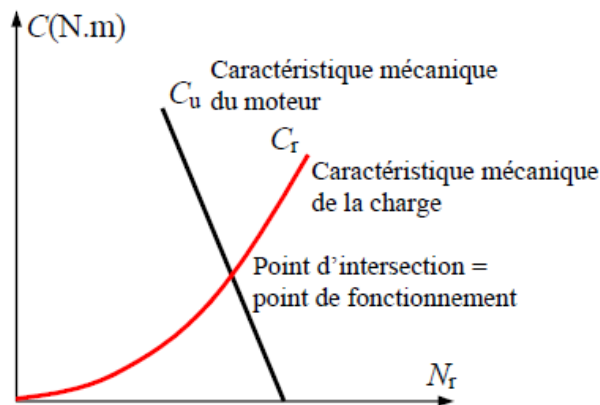


Figure 2.33 Détermination du point de fonctionnement d'un moteur DC

Les caractéristiques du moteur à courant continu dépendent du mode d'excitation et de la tension continue qui l'alimente. Pour une tension variable la vitesse varie aussi au fur et à mesure. Il en résulte que chaque cas correspondant à un mode d'excitation donné doit être étudié séparément.

**2.10- Exercices résolus sur les machines électriques à courant continu [13]**

**Exercice 01** : Un moteur de puissance utile 3 kW tourne à 1500 tr/min. Calculer le couple utile en Nm.

**Exercice 02**: La force électromotrice d'une machine à excitation indépendante est de 210 V à 1500 tr/min. Calculer la FEM pour une fréquence de rotation de 1000 tr/min, le flux étant constant.

**Exercice 03** : Un moteur à excitation indépendante alimenté sous 220 V possède une résistance d'induit de 0,8  $\Omega$ . A la charge nominale, l'induit consomme un courant de 15A. Calculer la f.é.m. E du moteur. La machine est maintenant utilisée en génératrice (dynamo). Elle débite un courant de 10 A sous 220 V. Déduisez la f.é.m.

**Exercice 04** : Une génératrice à excitation indépendante fournit une FEM de 220 V pour un courant d'excitation de 3,5 A. La résistance de l'induit est de 90 m $\Omega$ . Calculer la tension d'induit U lorsqu'elle débite 56 A dans le circuit de charge.

**Exercice 05** : La plaque signalétique d'un moteur à courant continu à excitation indépendante indique :

|            |             |        |
|------------|-------------|--------|
| 1,12 kW    | 1200 tr/min |        |
| Induit     | 220 V       | 5,7 A  |
| excitation | 220 V       | 0,30 A |
| 57 kg      |             |        |

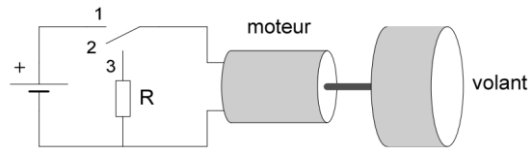
- 1- Calculer le couple utile nominal (en Nm).
- 2- Calculer le rendement nominal.

**Exercice 06** : La plaque signalétique d'une génératrice à courant continu à excitation indépendante indique :

|            |             |        |
|------------|-------------|--------|
| 11,2 Nm    | 1500 tr/min |        |
| Induit     | 220 V       | 6,8 A  |
| Excitation | 220 V       | 0,26 A |
| Masse      | 38 kg       |        |

- 1- Calculer la puissance mécanique consommée au fonctionnement nominal.
- 2- Calculer la puissance consommée par l'excitation.
- 3- Calculer la puissance utile.
- 4- En déduire le rendement nominal.

**Exercice 07** : Un moteur à courant continu à aimants permanents est couplé à un volant d'inertie (disque massif) :



1- On place le commutateur en position 1 : le moteur démarre et atteint sa vitesse nominale.

On place ensuite le commutateur en position 2 (Cocher la ou les bonnes réponses) :

- Le moteur s'emballe
- Le moteur change de sens de rotation
- Le moteur s'arrête lentement
- Le moteur s'arrête rapidement

2- On place à nouveau le commutateur en position

1. Puis on commute en position 3.

2-1- Que se passe-t-il ?

2-2- Que se passe-t-il si on diminue la valeur de la résistance R

2-3- Donner une application pratique.

**Exercice 08** : Un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante est alimenté sous 240 V. La résistance d'induit est égale à  $0,5 \Omega$ , le circuit inducteur absorbe 250 W et les pertes collectives s'élèvent à 625 W. Au fonctionnement nominal, le moteur consomme 42 A et la vitesse de rotation est de : 1200 tr/min.

1- Calculer :

- La f.é.m.
- La puissance absorbée, la puissance électromagnétique et la puissance utile
- Le couple utile et le rendement

2- Quelle est la vitesse de rotation du moteur quand le courant d'induit est de 30 A ? Que devient le couple utile à cette nouvelle vitesse (on suppose que les pertes collectives sont toujours égales à 625 W) ?

3- Calculer le rendement.

**Exercice 09** : La plaque signalétique d'un moteur à excitation indépendante porte les indications suivantes :  $U = 240 \text{ V}$ ,  $I = 35 \text{ A}$ ,  $P = 7 \text{ kW}$ ,  $n = 800 \text{ tr/min}$ .

Calculer (à la charge nominale):

- 1- Le rendement du moteur sachant que les pertes Joule inducteur sont de 150 watts.
- 2- Les pertes Joule induit sachant que l'induit a une résistance de  $0,5 \Omega$ .
- 3- La puissance électromagnétique et les pertes « constantes ».
- 4- Le couple électromagnétique, le couple utile et le couple des pertes « constantes ».

**Exercice 10** : Une machine d'extraction est entraînée par un moteur à courant continu à excitation indépendante. L'inducteur est alimenté par une tension  $u = 600 \text{ V}$  et parcouru par un courant d'excitation d'intensité constante :  $i = 30 \text{ A}$ .

L'induit de résistance  $R = 12 \text{ m}\Omega$  est alimenté par une source fournissant une tension  $U$  réglable de  $0 \text{ V}$  à sa valeur nominale :  $U_N = 600 \text{ V}$ . L'intensité  $I$  du courant dans l'induit a une valeur nominale :  $I_N = 1,50 \text{ kA}$ . La fréquence de rotation nominale est  $n_N = 30 \text{ tr/min}$ .

N.B. Les parties 1, 2, 3 sont indépendantes.

### 1- Démarrage

1-1- En notant  $\omega$  la vitesse angulaire du rotor, la fem du moteur a pour expression :  $E = K \omega$  avec  $\omega$  en rad/s.

Quelle est la valeur de  $E$  à l'arrêt ( $n = 0$ ) ?

1-2- Dessiner le modèle équivalent de l'induit de ce moteur en indiquant sur le schéma les flèches associées à  $U$  et  $I$ .

1-3- Ecrire la relation entre  $U$ ,  $E$  et  $I$  aux bornes de l'induit, en déduire la tension  $U_d$  à appliquer au démarrage pour que  $I_d = 1,2 I_N$ .

1-4- Citer un système de commande de la vitesse de ce moteur.

### 2- Fonctionnement nominal au cours d'une remontée en charge

2-1- Exprimer la puissance absorbée par l'induit du moteur et calculer sa valeur numérique.

2-2- Exprimer la puissance totale absorbée par le moteur et calculer sa valeur numérique.

2-3- Exprimer la puissance totale perdue par effet Joule et calculer sa valeur numérique.

2-4- Sachant que les autres pertes valent  $27 \text{ kW}$ , exprimer et calculer la puissance utile et le rendement du moteur.

2-5- Exprimer et calculer le moment du couple utile  $T_u$  et le moment du couple électromagnétique  $T_{em}$ .

### 3- Fonctionnement au cours d'une remontée à vide

3-1- Montrer que le moment du couple électromagnétique  $T_{em}$  de ce moteur est proportionnel

à l'intensité  $I$  du courant dans l'induit :  $T_{em} = KI$ .

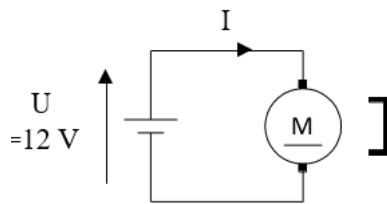
On admet que dans le fonctionnement au cours d'une remontée à vide, le moment du couple électromagnétique a une valeur  $T_{em}'$  égale à 10 % de sa valeur nominale et garde cette valeur pendant toute la remontée.

3-2- Calculer l'intensité  $I'$  du courant dans l'induit pendant la remontée.

3-3- La tension  $U$  restant égale à  $U_N$ , exprimer puis calculer la FEM  $E'$  du moteur.

3-4- Exprimer, en fonction de  $E'$ ,  $I'$  et  $T_{em}'$ , la nouvelle fréquence de rotation  $n'$ . Calculer sa valeur numérique.

**Exercice 11** : Un moteur de rétroviseur électrique d'automobile a les caractéristiques suivantes : Moteur à courant continu de 62 gramme, à aimants permanents,  $\phi = 28\text{mm}$ , longueur 38 mm tension nominale  $U_N = 12\text{ V}$ , FEM ( $E$  en V)  $10^{-3} \times$  vitesse de rotation ( $n$  en tr/min), Résistance de l'induit  $R = 3,5\ \Omega$ , Pertes collectives 1,6 W. Le moteur est alimenté par une batterie de FEM 12 V, de résistance interne négligeable (voir figure).



1- A vide, le moteur consomme 0,20 A. Calculer sa FEM et en déduire sa vitesse de rotation.

2- Que se passe-t-il si on inverse le branchement du moteur ?

3- En charge, au rendement maximal, le moteur consomme 0,83 A.

- Calculer : la puissance absorbée ; les pertes Joule ; la puissance utile ; le rendement maximal ; la vitesse de rotation ; la puissance électromagnétique ; le couple électromagnétique ; le couple utile ; le couple des pertes collectives

- Justifier que le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit. Vérifier que :  $T_{em}(\text{en Nm}) = 9,55 \times 10^{-3} \times I$  ; (en A)

- Calculer le courant au démarrage. En déduire le couple électromagnétique de démarrage.

- Le moteur tourne sous tension nominale. Que se passe-t-il si un problème mécanique



provoque le blocage du rotor.

**Exercice 12** : Un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante a les caractéristiques suivantes : tension d'alimentation de l'induit  $U = 160 \text{ V}$ , La résistance de l'induit  $R = 0,2 \Omega$ .

- 1- La f.é.m.  $E$  du moteur vaut  $150 \text{ V}$  quand sa vitesse de rotation est  $n = 1500 \text{ tr/min}$ . Déduisez la relation entre  $E$  et  $n$ .
- 2- Déterminer l'expression de  $I$  (courant d'induit en A) en fonction de  $E$ .
- 3- Déterminer l'expression de  $T_{em}$  (couple électromagnétique en Nm) en fonction de  $I$
- 4- Déduisez que :  $T_{em} = 764 - 0,477.n$
- 5- On néglige les pertes collectives du moteur. Justifier qu'alors :  $T_u$  (couple utile) =  $T_{em}$
- 6- Calculer la vitesse de rotation du moteur à vide.

**Résolution de l'exercice 01 :**

Un moteur de puissance utile  $3 \text{ kW}$  tourne à  $1500 \text{ tr/min}$ . Le couple utile est : (faut exprimer la vitesse de rotation en radians par seconde) :  $3000 / (1500 \cdot 2\pi / 60) = 19,10 \text{ Nm}$

**Résolution de l'exercice 02 :**

La force électromotrice d'une machine à excitation indépendante est de  $210 \text{ V}$  à  $1500 \text{ tr/min}$ .

La f.é.m. pour une fréquence de rotation de  $1000 \text{ tr/min}$  avec le flux constant est :

$E = k \cdot \phi \cdot \omega$  : à flux constant, la f.é.m. est proportionnelle à la vitesse de rotation.

$$E = 210 \cdot 1000 / 1500 = 140 \text{ V}.$$

**Résolution de l'exercice 03 :**

1- Un moteur à excitation indépendante alimenté sous  $220 \text{ V}$  possède une résistance d'induit de  $0,8 \Omega$ . A la charge nominale, l'induit consomme un courant de  $15 \text{ A}$ . Calculer la f.é.m.  $E$  du moteur.

$$E = U - RI = 220 - 0,8 \cdot 15 = 208 \text{ V}, (U > E \text{ en fonctionnement moteur})$$

2- La machine est maintenant utilisée en génératrice (dynamo). Elle débite un courant de  $10 \text{ A}$  sous  $220 \text{ V}$ . En déduire la f.é.m.

$$E = U + RI = 220 + 0,8 \cdot 10 = 228 \text{ V}, (E > U \text{ en fonctionnement génératrice})$$

**Résolution de l'exercice 04 :**

Une génératrice à excitation indépendante fournit une f.é.m. de 220 V pour un courant d'excitation de 3,5 A. La résistance de l'induit est de 90 mΩ. La tension d'induit U lorsqu'elle débite 56 A dans le circuit de charge est :

$$U = E - RI = 220 - 0,090 \times 56 = 215 \text{ V, (} U < E \text{ en fonctionnement génératrice)}$$

**Résolution de l'exercice 05 :**

1- Calculer le couple utile nominal (en Nm).

$$1,12 \times 10^3 / (1200 \times 2\pi / 60) = 1120 \text{ W} / (125,7 \text{ rad/s}) = 8,9 \text{ Nm}$$

2- Calculer le rendement nominal.

$$1120 / (220 \times 5,7 + 220 \times 0,3) = 1120 / 1320 = 84,8 \%$$

**Résolution de l'exercice 06 :**

1- Calculer la puissance mécanique consommée au fonctionnement nominal.

$$11,2 \times (1500 \times 2\pi / 60) = (11,2 \text{ Nm}) \times (157,1 \text{ rad/s}) = 1,76 \text{ kW}$$

2- Calculer la puissance consommée par l'excitation.

$$220 \times 0,26 = 57 \text{ W}$$

3- Calculer la puissance utile.

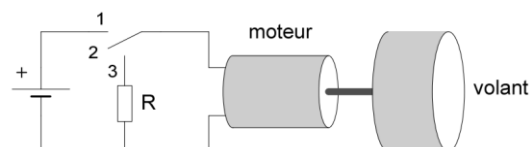
$$220 \times 6,8 = 1,50 \text{ kW}$$

4- En déduire le rendement nominal.

$$1500 / (1760 + 57) = 82,4 \%$$

**Résolution de l'exercice 07 :**

Un moteur à courant continu à aimants permanents est couplé à un volant d'inertie (disque massif) :



1- On place le commutateur en position 1 : le moteur démarre et atteint sa vitesse nominale.

On place ensuite le commutateur en position 2 :

- Le moteur s'emballe
- Le moteur change de sens de rotation
- Le moteur s'arrête lentement
- Le moteur s'arrête rapidement

2- On place à nouveau le commutateur en position 1, puis on commute en position 3.

2-1- Que se passe-t-il ?

Le volant s'arrête rapidement (la machine fonctionne en dynamo, l'énergie cinétique du volant est convertie en chaleur dans la résistance).

2-2- Que se passe-t-il si on diminue la valeur de la résistance R ? Le volant s'arrête plus rapidement.

2-3- Donner une application pratique. Système de freinage de train.

### **Résolution de l'exercice 08 :**

1- Calculer :

- La f.e.m.  $E = U - RI = 240 - 0,5 \times 42 = 219 \text{ V}$

- La puissance absorbée, la puissance électromagnétique et la puissance utile

-  $P_a = UI = 240 \times 42 = 10,08 \text{ kW}$

$P_{em} = EI = 219 \times 42 = 9,198 \text{ kW}$

$P_u = P_{em} - 625 = 8,573 \text{ kW}$

- Le couple utile et le rendement

$T_u = P_u / \omega = 8573 / (1200 \times 2\pi / 60) = 68,2 \text{ Nm}$

$\eta = P_u / P_a = 8573 / 10080 = 83,0 \%$

2- Quelle est la vitesse de rotation du moteur quand le courant d'induit est de 30 A ?

$E = U - RI = 240 - 0,5 \times 30 = 225 \text{ V}$

L'excitation est constante donc la f.e.m. est proportionnelle à la vitesse de rotation :

$n = (225/219) \times 1200 = 1233 \text{ tr/min}$

Que devient le couple utile à cette nouvelle vitesse (on suppose que les pertes collectives sont

toujours égales à 625 W) ? Calculer le rendement.

$$P_u = 225 \times 30 - 625 = 6,125 \text{ kW}$$

$$T_u = P_u / \omega = 6125 / (1233 \times 2\pi / 60) = 47,4 \text{ Nm}$$

$$P_a = 240 \times 30 + 250 = 7,45 \text{ kW}$$

$$\eta = 6125 / 7450 = 82,2 \%$$

### **Résolution de l'exercice 09 :**

La plaque signalétique d'un moteur à excitation indépendante porte les indications suivantes :

|           |                |
|-----------|----------------|
| U = 240 V | I = 35 A       |
| P = 7 kW  | n = 800 tr/min |

Calculer (à la charge nominale):

1- Le rendement du moteur sachant que les pertes Joule inducteur sont de 150 watts.

Puissance utile : 7 kW

Puissance absorbée par l'induit =  $UI = 240 \times 35 = 8,4 \text{ kW}$

Puissance absorbée par l'inducteur = pertes Joule à l'inducteur = 150 W

Puissance absorbée = puissance absorbée par l'induit + puissance absorbée par l'inducteur  
 $= 8400 + 150 = 8,55 \text{ kW}$

Rendement =  $7000/8550 = 81,9 \%$

2- Les pertes Joule induit sachant que l'induit a une résistance de 0,5 Ω.

3-  $RI^2 = 0,5 \times 35^2 = 0,61 \text{ kW}$

4- La puissance électromagnétique et les pertes « constantes ».

Puissance électromagnétique = f.é.m. induite x courant d'induit. La f.é.m. induite est :

$$E = U - RI = 240 - 0,5 \times 35 = 222,5 \text{ V}$$

$$EI = 222,5 \times 35 = 7,79 \text{ kW}$$

Autre méthode : En utilisant le bilan de puissance.

La puissance électromagnétique = puissance absorbée – pertes Joule totales

$$= 8,55 - (0,15 + 0,61) = 7,79 \text{ kW}$$

Bilan de puissance : Pertes constantes (ou pertes collectives à vide) = puissance électromagnétique – puissance utile =  $7,79 - 7 = 0,79 \text{ kW}$

5- Le couple électromagnétique, le couple utile et le couple des pertes constantes.

$$\text{Couple électromagnétique} = 7790 / (800 \times 2\pi / 60) = 93 \text{ Nm}$$

$$\text{Couple utile} = 7000 / (800 \times 2\pi / 60) = 83,6 \text{ Nm}$$

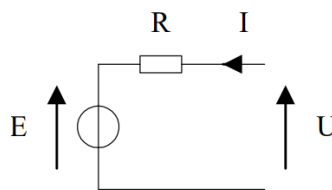
$$\text{Couple des pertes constantes} = 790 / (800 \times 2\pi / 60) = 93 - 83,6 = 9,4 \text{ Nm}$$

### **Résolution de l'exercice 10 :**

#### 1- Démarrage

1-1- En notant  $\omega$  la vitesse angulaire du rotor, la f.é.m. du moteur a pour expression :  $E = K \cdot \omega$  avec  $\omega$  en rad/s. Quelle est la valeur de E à l'arrêt ( $n = 0$ ) ?  $E = 0 \text{ V}$

1-2- Dessiner le modèle équivalent de l'induit de ce moteur en indiquant sur le schéma les flèches associées à U et I.



1-3- Ecrire la relation entre U, E et I aux bornes de l'induit, en déduire la tension  $U_d$  à appliquer au démarrage pour que  $I_d = 1,2 I_N$ .

$$U = E + RI ; U_d = R \cdot I_d = 1,2 R \cdot I_N = 1,2 \times 0,012 \times 1500 = 21,6 \text{ V}$$

1-4- Citer un système de commande de la vitesse : Montage hacheur, montage redresseur.

#### 2- Fonctionnement nominal au cours d'une remontée en charge

2-1- Exprimer la puissance absorbée par l'induit du moteur et calculer sa valeur numérique.

$$UI = U_N I_N = 600 \times 1500 = 900 \text{ kW}$$

2-2- Exprimer la puissance totale absorbée par le moteur et calculer sa valeur numérique.

$$UI + U_i = 900 \text{ kW} + 600 \times 30 = 900 \text{ kW} + 18 \text{ kW} = 918 \text{ kW}$$

2-3- Exprimer la puissance totale perdue par effet Joule et calculer sa valeur numérique.

$$RI^2 + U_i = 0,012 \times 1500^2 + 18 \text{ kW} = 27 \text{ kW} + 18 \text{ kW} = 45 \text{ kW}$$

2-4- Sachant que les autres pertes valent 27 kW, exprimer et calculer la puissance utile et le rendement du moteur.

$$\text{Pertes collectives} = 27 \text{ kW}$$

$$\text{Puissance utile} = 918 - (45 + 27) = 846 \text{ kW}$$

$$\text{Rendement} = 846 \text{ kW} / 918 \text{ kW} = 92,2 \%$$

2-5- Exprimer et calculer le couple utile  $T_u$  et le couple électromagnétique  $T_{em}$ .

$$T_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{846 \text{ kW}}{30 \times \frac{2\pi}{60}} = \frac{846 \text{ kW}}{3,14 \text{ rad/s}} = 269 \text{ kNm}$$

Puissance électromagnétique = Puissance utile + Pertes collectives = 846 + 27 = 873 kW

3- Fonctionnement au cours d'une remontée à vide

3-1- Montrer que le moment du couple électromagnétique  $T_{em}$  de ce moteur est proportionnel à l'intensité  $I$  du courant dans l'induit :  $T_{em} = KI$ .

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{873 \text{ kW}}{30 \times \frac{2\pi}{60}} = \frac{873 \text{ kW}}{3,14 \text{ rad/s}} = 278 \text{ kNm}$$

Formule générale :  $T_{em} = k \cdot \phi \cdot I$ , Ici, le courant d'excitation est constant donc le flux magnétique est constant, donc le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit :

$$T_{em} = K \cdot I$$

On admet que dans le fonctionnement au cours d'une remontée à vide, le moment du couple électromagnétique à une valeur  $T_{em}'$  égale à 10 % de sa valeur nominale et garde cette valeur pendant toute la remontée.

3-2- Calculer l'intensité  $I'$  du courant dans l'induit pendant la remontée.

$$T_{em} = K \cdot I; T_{em}' = K I'$$

$$I' = I \frac{T_{em}'}{T_{em}} = \frac{I}{10} = 150 \text{ A}$$

3-3- La tension  $U$  restant égale à  $U_N$ , exprimer puis calculer la f.é.m.  $E'$  du moteur.

$$E' = U - R I' = 600 - 0,012 \times 150 = 598,2 \text{ V}$$

3-4- Exprimer, en fonction de  $E'$ ,  $I'$  et  $T_{em}'$ , la nouvelle fréquence de rotation  $n'$ . Calculer sa valeur numérique.

$$E' = K \cdot \Omega'$$

$$E' = \frac{T_{em}' \Omega'}{I'}$$

$$\Omega' = \frac{E'I'}{T_{em}'}$$

$$n' = \frac{60}{2\pi} \frac{E'I'}{T_{em}'} = \frac{60}{2\pi} \frac{E'I'}{\frac{T_{em}'}{10}} = \frac{60}{2\pi} \frac{598,2 \times 150}{27800} = 30,84 \text{ tr/min}$$

**Résolution de l'exercice 11 :**

1- A vide, le moteur consomme 0,20 A. Calculer sa f.é.m. et en déduire sa vitesse de rotation.

$$E = U - RI = 12 - 3,5 \times 0,2 = 11,3 \text{ V} ; n = 11,3 \times 1000 = 11\,300 \text{ tr/min}$$

2- Que se passe-t-il si on inverse le branchement du moteur ?

Le sens de rotation est inversé.

3- En charge, au rendement maximal, le moteur consomme 0,83 A. Calculer :

- La puissance absorbée  $UI = 12 \times 0,83 = 9,96 \text{ W}$

- Les pertes Joule  $RI^2 = 3,5 \times 0,83^2 = 2,41 \text{ W}$

- La puissance utile  $9,96 - 2,41 - 1,6 = 5,95 \text{ W}$

- le rendement maximal  $5,95/9,96 = 59,7 \%$

- La vitesse de rotation  $E = U - RI = 12 - 3,5 \times 0,83 = 9,10 \text{ V}$ ,  $n = 9,10 \times 1000 = 9100 \text{ tr/min}$

- La puissance électromagnétique  $EI = 9,10 \times 0,83 = 7,55 \text{ W}$

- Le couple électromagnétique  $7,55 / (9100 \times 2\pi / 60) = 7,93 \text{ mNm}$

- Le couple utile  $5,95 / (9100 \times 2\pi / 60) = 6,25 \text{ mNm}$

- Le couple des pertes collectives  $7,93 - 6,25 = 1,68 \text{ mNm}$

4- Justifier que le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit.

On sait que :  $T_{em} = k \cdot \phi \cdot I$ , Le flux est constant car il s'agit d'un moteur à aimants permanents

Vérifier que :  $T_{em} \text{ (en Nm)} = 9,55 \times 10^{-3} \cdot I \text{ (en A)}$

D'après 3- :  $k \cdot \phi = T_{em}/I = 7,93 \cdot 10^{-3} / 0,83 = 9,55 \cdot 10^{-3}$

Autre méthode :  $k \phi = E/\omega = (60/(2\pi)) \cdot E/n = (60/(2\pi)) \times 10^{-3} = 9,55 \cdot 10^{-3}$

5- Calculer le courant au démarrage.  $n = 0$   $E = 0$  d'où  $I = U/R = 12/3,5 = 3,43 \text{ A}$

En déduire le couple électromagnétique de démarrage.  $9,55 \times 10^{-3} \times 3,43 = 32,7 \text{ m.N.m}$

6- Le moteur tourne sous tension nominale.

Que se passe-t-il si un problème mécanique provoque le blocage du rotor ?

$n = 0$  et  $I = 3,43 \text{ A}$  en permanence : le moteur se grille.

**Résolution de l'exercice 12 :**

1- Pour un moteur à courant continu à excitation indépendante, la f.é.m.  $E$  du moteur égale à

150V, quand sa vitesse de rotation est  $n=1500$  tr/min. En déduire la relation entre E et n.

L'excitation étant constante, E est proportionnelle à n :  $E = 0,1x n$  (tr/min)

2- Déterminer l'expression de I (courant d'induit en A) en fonction de

$$E.I = (U - E) / R$$

3- Déterminer l'expression de  $T_{em}$  (couple électromagnétique en Nm) en fonction de I.

$T_{em} = k.\Phi.I$ ,  $E = k.\Phi.\Omega$ , et  $\Omega=2\pi.n/60$  ce qui implique :

$$k\Phi = \frac{E}{n} \frac{60}{2\pi} = 0,1 \frac{60}{2\pi} = 0,955 \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$$

$$T_{em} \text{ (en Nm)} = 0,955xI \text{ (en A)}$$

4- En déduire que :  $T_{em} = 764 - 0,477xn$

$$T_{em} = k.\Phi.I = k.\Phi.(U - E)/R = k.\Phi.(U - 0,1n)/R = 764 - 0,477xn$$

5- On néglige les pertes collectives du moteur. Justifier qu'alors :  $T_u$  (couple utile) =  $T_{em}$

Le couple des pertes collectives est négligeable :  $T_u = T_{em} - T_{\text{pertes collectives}} = T_{em}$

6- Calculer la vitesse de rotation du moteur à vide.

$$T_u = 0, T_{em} = 0, n = 764/0,477 = 1600 \text{ tr/min}$$

Autre méthode :  $E = U$  (à vide,  $I = 0$  si on néglige les pertes collectives).

$$n = 160/0,1 = 1600 \text{ tr/min}$$



## Chapitre 3 : Les Transformateurs

### 3.1- Introduction

Le transformateur est à l'électricité ce que l'engrenage est à la mécanique. Un engrenage permet à une voiture de donner un grand couple à basse vitesse (pour accélérer) et un petit couple à haute vitesse. En mécanique les variables sont: le couple ( $T$  en Nm) et la vitesse angulaire ( $\omega$  en radians/sec).

$$T_1 \cdot \omega_1 = T_2 \cdot \omega_2 = \text{Puissance réelle en watts} \quad (3.1)$$

En électricité les variables sont: la tension ( $U$  en volts), le courant ( $I$  en ampères).

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 = \text{Puissance apparente en voltampères (VA)} \quad (3.2)$$

Par définition : un transformateur électrique est un convertisseur statique électromagnétique qui permet de transformer les valeurs de la tension et du courant électrique alternative en une tension et courant de valeurs différentes mais de même fréquence, de même forme et presque de même puissance. Cette transformation est effectuée avec un excellent rendement. La figure 3.1 illustre un ensemble de transformateurs triphasés pour réseaux électriques.

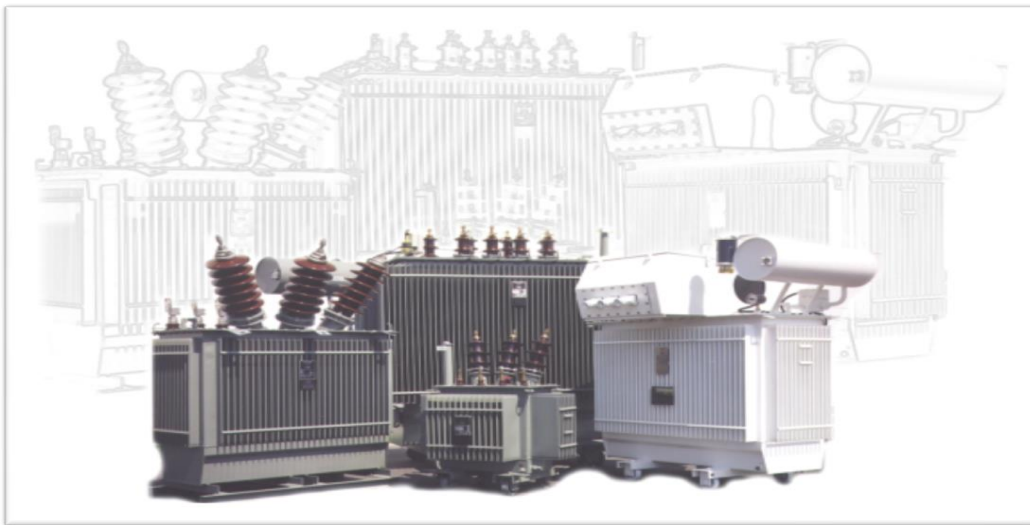


Figure 3.1 Transformateurs électriques

Un transformateur permet l'utilisation de l'énergie électrique à basse tension (sécurité) et permet la transmission à haute tension (rendement, régulation et économie). En effet, à haute tension, l'énergie transportée subira moins de pertes, aura une variation de tension plus faible et nécessitera des conducteurs plus légers, donc économie d'investissement. Le transport de l'énergie électrique ne peut se faire qu'en haute tension ; il faudra donc élever la tension fournie par l'alternateur des centrales de production électrique (de 2 à 20kv) avant de pouvoir la transporter. La haute tension est extrêmement dangereuse et nécessite une isolation

exceptionnelle. Il est donc hors de question d'alimenter des installations domestiques et industrielles en 220kv (à titre d'exemple). Il est nécessaire d'abaisser la tension après transport et se sont les transformateurs qui réalisent le plus économiquement ces opérations.

La conception d'un transformateur est faite à partir d'un cahier des charges ou d'une simple demande. Tous types de transformateurs électriques à des caractéristiques de courant d'appel, de pertes joules, des tensions d'isolement ou encore des courants de charges spécifiques [13].

### **3.2- Historique**

Les principes du transformateur ont été établis en 1831 par Michael Faraday, mais celui-ci ne s'en servit que pour démontrer le principe de l'induction électromagnétique et n'en prévint les applications pratiques.

Lucien Gaulard réussit avec John Dixon Gibbs à transmettre du courant alternatif sous une tension de 2000 volts sur une distance de 40 km, à l'aide de transformateurs avec un noyau en forme de barres. Ce fut en 1883. En 1884, Lucien Gaulard présenta à la Société française des Electriciens, un " générateur secondaire ", dénommé depuis transformateur. Dans la même année, il plaça en service une liaison bouclée de démonstration (133 Hz) alimentée du courant alternatif sous 2000 v sur une distance de 80 km. On a fini alors par admettre l'intérêt du transformateur pour le transport de l'énergie électrique par des lignes à haute tension.

En 1885, les Hongrois Károly Zipernowsky, Miksá Déry et Otto Titus Bláthy mettent au point un transformateur avec un noyau annulaire commercialisé par la firme Ganz à Budapest.

Depuis la fin du siècle, le transformateur sec a été progressivement remplacé par le transformateur dans l'huile. Au début, des avaries se produisaient parce qu'on ne savait pas protéger l'huile contre l'action oxydante de l'air, mais ceci à été résolu grâce aux conservateurs d'huile mis en service au début de ce siècle. L'utilisation de l'acier allié dit acier à transformateur de 1904 à 1911, le poids de l'acier d'un transformateur dans l'huile de 20 KVA a diminué de plus de la moitié et le poids du cuivre a diminué de presque 40% pour le même rendement.

Il existe différents types de transformateurs, mais nous-nous limiterons à l'étude du transformateur de puissance, du fait qu'il présente le plus grand intérêt au le développement de l'interconnexion des réseaux.

Dès 1930 on a construit un transformateur triphasé à cinq colonnes de 100.000 KVA et en 1936 un transformateur triphasé de  $3 \times 65 = 195.000$  KVA a refroidissement normal par soufflage d'air et de  $3 \times 80 = 240000$  KVA a refroidissement forcé. La centrale hydraulique

Lénine sur la Volga comporte des groupes de transformateurs de 3x125000 KVA chacun. L'énergie de cette centrale est transmise par Moscou sous la tension De 400 KVA en 1952 [14].

Le couplage inductif entre deux enroulements entourant un noyau ferromagnétique a été découvert en 1831 par Faraday qui démontrait la création d'une force électromotrice dans l'un des enroulements lorsqu'on on faisait varier le courant dans l'autre. Vers la fin des années 40 du dix-huitième siècle on a vu apparaître des bobines d'induction de Jacobi entre autres, utilisées plus tard comme source de tensions alternatives au moyen d'une bobine d'induction.

L'utilisation du transformateur à circuit magnétique ouvert a été faite en 1882 par Gaulard et Gibbs pour la transformation de tension avec une bobine d'induction comportant un enroulement primaire et plusieurs enroulements secondaires.

Le premier transformateur à circuit magnétique fermé a été imaginé et réalisé 1884 par les frères John et Edouard Hopkinson. Son circuit magnétique avait la forme d'un « O » et était constitué par un empilage de plaquettes ou de fils de fer isolés.



Figure 3.2 Transformateurs triphasés HT/MT suspendus a des supports électriques

### 3.3- Constitution

Il est constitué de deux parties essentielles, les enroulements électriques placés autour d'un circuit magnétique commun. Généralement la construction des transformateurs peut être à colonne ou cuirassé, constituée d'une culasse fermant ainsi le noyau ferromagnétique (circuit magnétique) et d'un ou plusieurs enroulements qu'on appellera selon la destination : primaire ou secondaire, de basse ou de haute tension comme le montre la figure 3.3 ci-dessous.

#### 3.3.1- Noyau magnétique

Le circuit magnétique d'un transformateur est soumis à un champ magnétique variable en fonction du temps. Pour les transformateurs reliés au réseau de distribution, cette fréquence est

de 50 ou 60 Hertz. Le circuit magnétique est formé de tôles d'acier feuilletées et collées les unes aux autres par du vernis ou papier spécial pour réduire les pertes par courants de Foucault. L'isolation en papier est beaucoup meilleur marché que le vernis, mais sa conductibilité et sa résistance à la chaleur et sa résistance mécanique sont moindre. Le circuit magnétique est traversé par un flux magnétique alternatif. L'ensemble des pertes dans le fer sont à 1w/kg pour  $B=1T$  et  $f=50\text{hz}$ . Pour les transformateurs puissants on utilise des tôles à 0,60w/kg [15].

Pour les transformateurs les plus courants, les tôles empilées ont la forme de E et de I, permettant ainsi de glisser une bobine à l'intérieur des fenêtres du circuit magnétique ainsi constitué. Les circuits magnétiques des transformateurs " haut de gamme " ont la forme d'un tore. Le bobinage des tores étant plus délicat, le prix des transformateurs toriques est nettement plus élevé [14].

Le circuit magnétique est généralement placé dans une cuve. Cette dernière est une enceinte pleine d'huile électrique de refroidissement. Il est à noter que l'huile Ascarel est strictement interdit du fait de son influence pathologique cancéreuse. La figure 3.4 montre un transformateur triphasé ou le circuit magnétique entouré par des bobines est plongé dans la cuve d'huile. La cuve est sous forme d'ailettes pour agrandir la surface de contact avec l'air et favoriser le refroidissement.

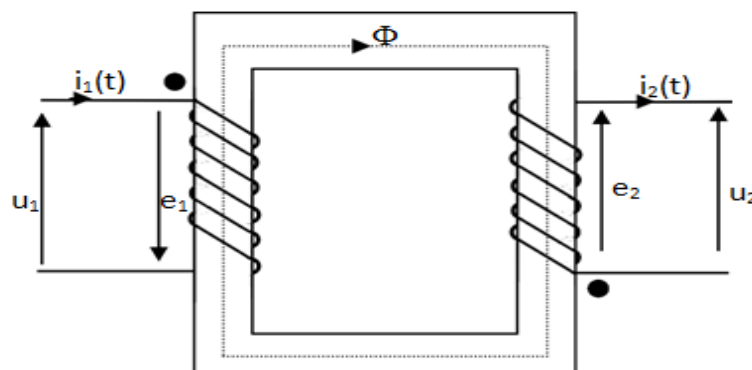


Figure 3.3 Schématisation d'un transformateur électrique monophasé

### 3.3.2- Bobinage

Le nombre de spires des deux enroulements (primaire et secondaire) sont différents. L'enroulement qui en comporte le plus est dit (haute tension). Il est en fil plus fin que le deuxième dit (basse tension).

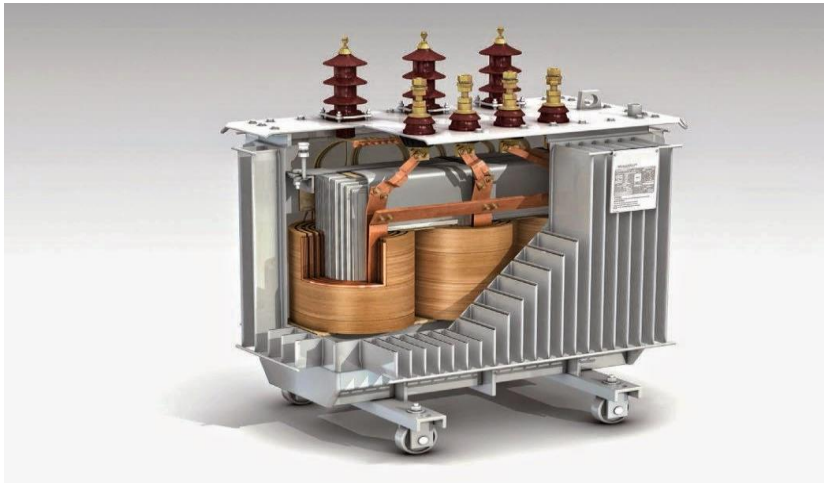


Figure 3.4 Transformateur triphasé montrant le circuit magnétique et les bobines dans la cuve d'huile

Les transformateurs peuvent être monophasés ou triphasés, à colonne ou cuirassé (comme le montre la figure 3.5 ci-dessous).

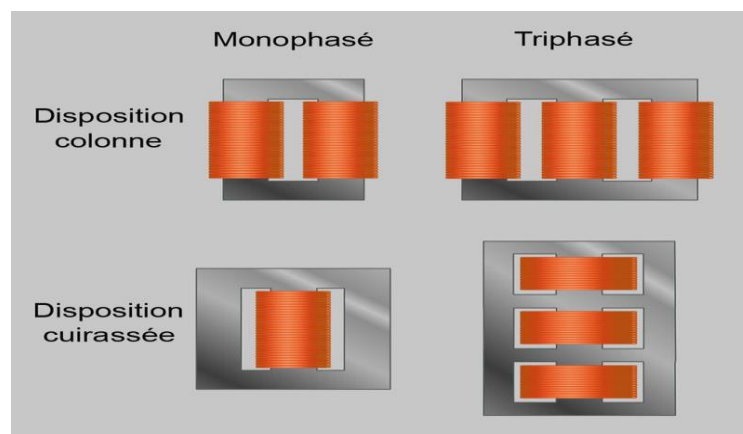


Figure 3.5 Différents types de circuit magnétique et bobinages [16]

### 3.4- Principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé

Avant d'entamer les transformateurs de puissance triphasée, il nous paraît utile d'étudier le fonctionnement et le comportement des transformateurs monophasés qui ne sont qu'une conception facile et didactiquement plus assimilables.

Le fonctionnement du transformateur monophasé est décrit comme suit : le secondaire n'est pas électriquement relié à une source, mais il alimente des appareils que nous voulons faire fonctionner. Si la valeur efficace de la tension appliquée au primaire est plus grande que celle délivrée par le secondaire, le transformateur est abaisseur de tension. Il est élévateur dans le cas contraire. La figure 3.6 présentée ci-dessous schématise ce qui a été expliqué.

Lorsqu'on alimente le primaire par une tension alternative, la variation du courant crée un flux magnétique au niveau de la colonne conformément à la loi :

$$d\Phi = -L \frac{dI}{dt} \quad ; \text{ Weber} \quad (3.3)$$

Le flux magnétique qui circulera dans le noyau magnétique est appelé flux magnétique principal. Le reste au niveau des bobines primaire et secondaire est appelé flux de fuite ou de dispersion.

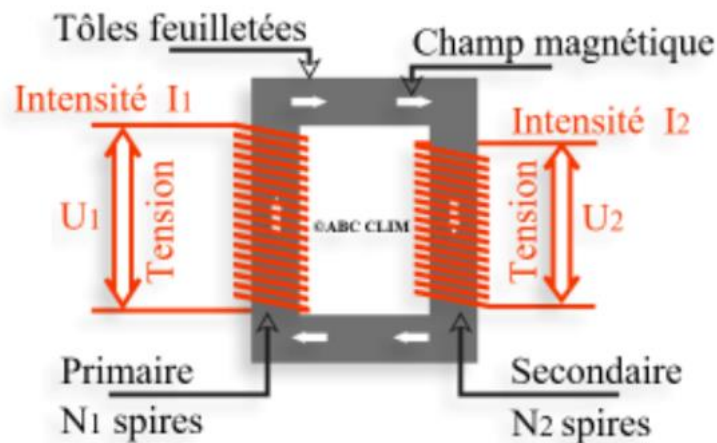


Figure 3.6 présentation schématique d'un transformateur monophasé

Ce dernier constitue les pertes magnétiques aux voisinages des enroulements. Au niveau du secondaire et selon la Loi de Faraday une FEM va être créée et induite par la variation du flux magnétique considérée aussi alternative et s'exprime comme suit :

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \text{ V} \quad (3.4)$$

Cette FEM engendre à son tour un courant induit qui sera livré au circuit connecté avec l'enroulement secondaire.

### 3.5- Formule de Boucherot et son application au transformateur

La formule de Boucherot établit un lien entre la tension sinusoïdale aux bornes d'un enroulement bobiné autour d'un circuit magnétique et le champ magnétique au sein de ce circuit. Elle est souvent utilisée pour déterminer l'amplitude du champ magnétique présent dans le circuit magnétique d'un transformateur.

$$E = 4,44 \cdot N \cdot \Phi \cdot f \quad ; \text{ (v)} \quad (3.5)$$

Où E est l'expression de la tension efficace aux bornes d'un enroulement,  $\Phi$  représente le flux magnétique variable, N étant le nombre de spire de l'enroulement.

Cette relation n'est utilisable qu'en régime sinusoïdal de tension, Cette formule vient directement de la loi de Faraday appliquée à un champ magnétique sinusoïdal.

L'intérêt pour le dimensionnement est lorsqu'un des enroulements du transformateur est relié au réseau, ce dernier se comporte comme générateur de tension quasi idéal et impose donc la tension. La formule de Boucherot permet alors de déterminer l'amplitude du champ magnétique dans le circuit magnétique et de vérifier que ce dernier n'est pas saturé. La connaissance du champ magnétique permet également de remonter au courant magnétisant qui est le courant à vide du transformateur.

Appliquant maintenant cette loi aux circuits du transformateur monophasé :

$$E_1 = 4,44 \cdot N_1 \cdot \Phi \cdot f_1 \quad \text{Pour le circuit primaire} \quad (3.6)$$

$$E_2 = 4,44 \cdot N_2 \cdot \Phi \cdot f_2 \quad \text{Pour le circuit secondaire} \quad (3.7)$$

On entend par « rapport de transformation », le rapport des forces électromagnétiques induites dans le primaire et le secondaire du transformateur en tenant compte du fait que les fréquences  $f_1$  et  $f_2$  sont égales est exprimé comme suit :

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 \cdot N_1 \cdot \Phi \cdot f_1}{4,44 \cdot N_2 \cdot \Phi \cdot f_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.8)$$

Comme les puissances apparentes des circuits primaire et secondaire sont aussi égales selon la loi de la conservation de l'énergie, on peut écrire la relation suivante :

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (3.9)$$

### 3.6- Transformateur réduit

Dans le cas général, on a le nombre de spires du primaire  $N_1$  différent de  $N_2$  et automatiquement les courants  $I_1$  et  $I_2$  doivent être différents. Vu que les forces électromotrices et les courants sont différents, les paramètres des enroulements ne sont pas les mêmes. Ceci rend l'évaluation quantitative et qualitative des phénomènes plus compliqué ; ainsi que les diagrammes vectoriels deviennent plus difficiles à tracer. La méthode la plus simple pour simplifier le problème est de ramener les paramètres du circuit secondaire au primaire.

$$\text{FEM réduite : } E'_2 = K \cdot E_2 = E_1, \text{ ceci implique : } K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.10)$$

$$\text{Courant réduit : } E'_2 \cdot I'_2 = E_2 \cdot I_2, \text{ Ce qui implique que : } I'_2 = \frac{E_2 \cdot I_2}{E'_2} = \frac{I_2}{K} \text{ cad :}$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{K} = I_1 \quad (3.11)$$

Résistance réduite : selon la loi de la conservation de l'énergie nous avons :

$$I_2'^2 \cdot R'_2 = I_2^2 \cdot R_2 \implies R'_2 = \frac{I_2^2}{I_2'^2} \cdot R_2 = K^2 \cdot R_2 = R_1 \implies R'_2 = K^2 \cdot R_2 = R_1 \quad (3.12)$$

$$\text{Réactance réduite : analogiquement aux résistances : } X'_2 = K^2 \cdot X_2 = X_1 \quad (3.13)$$

$$\text{Impédances réduite : analogiquement aux résistances : } Z'_2 = K^2 \cdot Z_2 = Z_1 \quad (3.14)$$

### 3.7- Equation des FEM et FMM d'un transformateur monophasé

Si on considère que  $F_0$  est la FMM du circuit magnétique,  $F_1$  est la FMM du circuit primaire et  $F_2$ , la FMM du circuit secondaire, nous pouvons écrire que :

$$F_0 = F_1 + F_2 \quad (3.15)$$

Conformément à la loi qui stipule que :  $F=N.I$ , nous écrivons :

$$N_1 \cdot I_0 = N_1 I_1 + N_1 \cdot I'_2 \quad (3.16)$$

$F_0$  est la FMM nécessaire pour créer le flux magnétique principal qui est reparti uniformément suivant la section du noyau ferromagnétique. On déduit que :

$$I_0 = I_1 + I'_2 \quad (3.17)$$

Les équations des FEM s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} V_1 = -E_1 + I_1 \cdot Z_1 \\ V'_2 = E'_2 - I'_2 \cdot Z'_2 \\ E'_2 = E_1 = V'_2 + I'_2 \cdot Z'_2 \end{cases} \quad (3.19)$$

### 3.8- Equation générales de fonctionnement

En partant des équations interprétant les circuits électriques (loi d'Ohm) et le circuit magnétique (loi de Faraday) suivantes :

$$\begin{cases} V_1 = R_1 \cdot I_1 + N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \\ -V_2 = R_2 \cdot I_2 + N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} \end{cases} \quad (3.20)$$

$\Phi_1$  et  $\Phi_2$  sont respectivement les flux des enroulements primaire et secondaire.

$$\begin{cases} \Phi_1 = \Phi + \Phi_{\delta 1} \\ \Phi_2 = \Phi + \Phi_{\delta 2} \end{cases} \quad (3.21)$$

$\Phi_{\delta 1}$  et  $\Phi_{\delta 2}$  représentent respectivement les flux de fuite du circuit primaire et secondaire.

$$\begin{cases} N_1 \cdot \Phi_{\delta 1} = L_1 \cdot I_1 \\ N_2 \cdot \Phi_{\delta 2} = L_2 \cdot I_2 \end{cases} \quad (3.22)$$

On peut déduire que :

$$\begin{cases} N_1 \cdot \Phi_1 = N_1 \cdot \Phi + L_1 \cdot I_1 \\ N_2 \cdot \Phi_2 = N_2 \cdot \Phi + L_2 \cdot I_2 \end{cases} \quad (3.23)$$

Les équations générales s'écrivent dans ce cas de la façon suivante :



$$\begin{cases} V_1 = I_1 \cdot R_1 + L_1 \cdot \frac{dI_1}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ -V_2 = I_2 \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{dI_2}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 = \bar{R} \cdot \Phi \end{cases} \quad (3.24)$$

Où  $\bar{R}$  est la réluctance du circuit magnétique. On peut écrire aussi que :

$$e_f = -L \cdot \frac{dI_1}{dt} = -L \cdot \frac{d(I_m \cdot \sin \omega t)}{dt} = -L \cdot \omega \cdot I_m \cdot \cos \omega t \quad (3.25)$$

Du moment où  $L \cdot \omega = X$ , alors la FEM de fuite s'écrit :

$$e_f = -X \cdot I_m \cdot \cos \omega t = -j \cdot I \cdot X \quad (3.26)$$

Alors on peut aussi écrire le système d'équations à la base duquel on pourra établir le schéma équivalent et le diagramme vectoriel.

$$\begin{cases} V_1 = I_1 \cdot R_1 + j \cdot I_1 \cdot X_1 - E_1 \\ V_2 = -I_2 \cdot R_2 - j \cdot I_2 \cdot X_2 + E_2 \\ N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 = \bar{R} \cdot \Phi \end{cases} \quad (3.27)$$

### 3.9- Transformateur parfait ou idéal

Un transformateur parfait est idéal dans lequel on ne tient pas compte d'une part des éléments qui ne consomment de l'énergie (résistance primaire et secondaire dans le circuit électrique, hystérésis et courant de Foucault dans le circuit magnétique et d'autre part, les éléments qui consomment de l'énergie réactive (inductance de fuite des enroulements et reluctance). Le transformateur parfait est virtuel sans aucune perte. Il est utilisé pour modéliser les transformateurs réels.

Dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux sont négligées, le rapport du nombre de transformateur.

**Exemple:** Un transformateur dont le primaire comporte **400** spires alimenté par une tension sinusoïdale de **800 V** de tension efficace, le secondaire qui comporte **100 spires** présentera à ses bornes une tension sinusoïdale dont la valeur efficace sera égale à **200 V**.

Les équations de fonctionnement s'écrivent dans ce cas comme suit :

$$\begin{cases} V_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ -V_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \\ N_1 \cdot I_1 + N_2 \cdot I_2 = 0 \end{cases} \quad (3.28)$$

Le transformateur parfait est idéal pour les courants, tensions et puissances :

$$S_1 = S_2 \implies V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2 \implies \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.29)$$

Il est parfait pour les puissances actives comme pour les puissances réactives. Toutes les puissances se conservent :

$$P_1 = P_2 \quad V_1 I_1 \cdot \cos(\varphi_1) = V_2 I_2 \cdot \cos(\varphi_2) \quad (3.30)$$

$$Q_1 = Q_2 \quad V_1 I_1 \cdot \sin(\varphi_1) = V_2 I_2 \cdot \sin(\varphi_2) \quad (3.31)$$

### 3.10- Schéma équivalent d'un transformateur réel

L'étude analytique et graphique du fonctionnement d'un transformateur est simplifiée lorsqu'on remplace un transformateur réel dans lequel les enroulements sont couplés électromagnétiquement par un schéma dont les enroulements ne sont couplés qu'électriquement.

Le schéma équivalent (voir figure 3.7), doit satisfaire en premier lieu les équations des FEM et FMM du transformateur. Le circuit magnétique est simulé électriquement par une résistance et réactance à vide ( $R_0$  et  $X_0$ ).

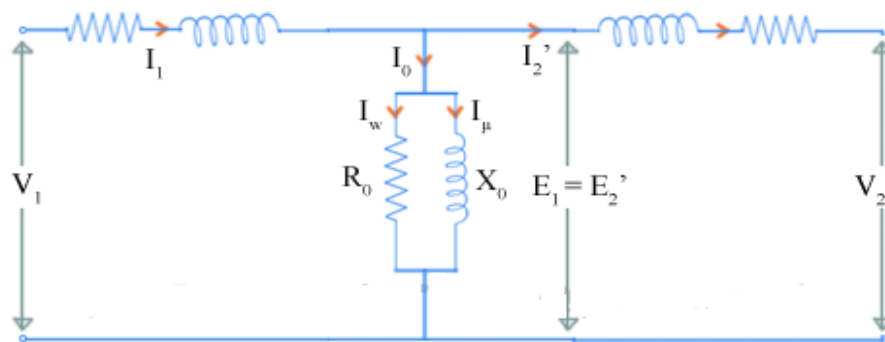


Figure 3.7 Schéma équivalent en T d'un transformateur

$$-E_1 = I_0 \cdot Z_0 = I_0 \cdot (R_0 + jX_0) \quad (3.32)$$

$Z_0$  est l'impédance du circuit magnétique et  $Z_{ch}$  est l'impédance de charge

$$R_0 = \frac{P_f}{I_0^2} \quad (3.33)$$

$$V_2' = I_2'(Z_2' + Z_{ch}) \quad (3.34)$$

$$I_2'(Z_2' + Z_{ch}) = E_2' = E_1 \quad \text{implique que } I_2' = \frac{E_1}{(Z_2' + Z_{ch})} \quad (3.35)$$

$$I_1 = I_0 + I_2' = -\frac{E_1}{(Z_2' + Z_{ch})} + \frac{-E_1}{Z_0} \quad \text{d'où } -E_1 = I_1 \frac{1}{\left(\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{(Z_2' + Z_{ch})}\right)} \quad (3.36)$$

Et puisque :  $V_1 = -E_1 + I_1 Z_1$ , on aura à la fin :

$$I_1 = V_1 \frac{1}{Z_1 + \left(\frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{(Z_2' + Z_{ch})}}\right)} = \frac{V_1}{Z_{eq}} \quad (3.37)$$

Ici  $Z_{eq}$  représente l'impédance équivalente du schéma équivalent en T

### 3.11- Les pertes de puissance d'un transformateur

**A) - Les pertes par effet Joule :** Elles sont dues à la circulation du courant dans les enroulements et sont appelées également " pertes dans le cuivre ". Elles dépendent de la résistance du cuivre, du carré de l'intensité du courant qui les traverse et du temps que cela durera.

**B) Les pertes par courants de Foucault :** Le circuit magnétique qui est le siège d'une induction sinusoïdale est parcouru par des courants induits appelés courants de Foucault. Ils produisent par effet Joule un dégagement de chaleur au sein du même circuit magnétique. Pour les réduire, on est amené à feuilletter les tôles puis à les coller les unes aux autres et à les isolées par du vernier ou par du papier spécial.

Les pertes par hystérésis : l'hystérésis est un phénomène qui entraîne une consommation d'énergie qui apparaît sous forme de chaleur dans le circuit magnétique comme les courants de Foucault. L'aire du cycle d'hystérésis correspond à l'énergie perdue. C'est pour cette raison qu'on choisit des matériaux qui ont un cycle d'hystérésis étroit (exp : les tôles au Silicium).

**C) Mesure des pertes :** La méthode des pertes séparées consiste à placer le transformateur dans deux états distincts:

Le premier état est pour lequel les pertes Joules sont élevées (fort courant) et les pertes magnétiques sont très faibles (faible tension). L'essai en court-circuit du transformateur avec une alimentation en tension très faible permet de réaliser ces deux conditions. Les pertes du transformateur sont alors quasiment égales aux pertes Joules.

Le second état est pour lequel les pertes magnétiques sont élevées (forte tension) et où les pertes joules sont très faibles (faible courant). L'essai à vide, c'est-à-dire sans charge relié au secondaire, ou ce dernier est ouvert correspond à ce cas. Les pertes sont alors quasiment égales aux pertes magnétiques.

On dit que l'on a deux états qui permettent " une séparation " des pertes d'où l'expression " méthode des pertes séparées ". Elles ont également l'avantage de permettre la mesure du rendement avec une consommation de puissance réduite, sans faire l'essai en fonctionnement réel. Ceci est intéressant lorsqu'on réalise les tests d'un transformateur de forte puissance et que l'on ne dispose pas dans l'atelier de la puissance nécessaire pour l'alimenter à son régime nominal. Mis à part pour les plates-formes d'essai chez les constructeurs, cette méthode n'a donc pas grand intérêt pour uniquement connaître le rendement car, dans ce contexte, une

mesure directe à puissance nominale (normale) est bien souvent suffisante. En revanche, dans le cadre de l'électrotechnique théorique, elle est importante car elle permet de déterminer les éléments permettant de modéliser le transformateur [17]. Le bilan de puissance est montré sur la figure 3.8 ci-dessous.

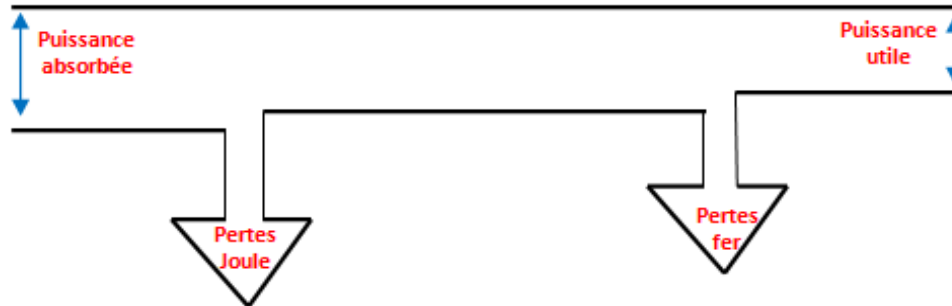


Figure 3.8 Bilan de puissance d'un transformateur monophasé

### 3.12- Les différents types de transformateurs

Ces transformateurs se différencient selon leurs diverses applications possibles. En ce sens on distingue :

#### 3.12.1- Les autotransformateurs

Il s'agit d'un transformateur sans isolement entre le primaire et le secondaire. Cette structure a la particularité du secondaire faisant partie de l'enroulement primaire. Le courant alimentant le transformateur parcourt le primaire en totalité et une dérivation à un point donné détermine la sortie du secondaire. Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie est fixé par le nombre de spires du secondaire entrant en jeu dans la transformation (figure 3.9).

A rendement égal, un autotransformateur occupe moins de place qu'un transformateur classique ; cela est dû au fait qu'il n'y a qu'un seul enroulement et que la partie commune du bobinage unique est parcourue par la différence des courants primaire et secondaire. L'autotransformateur est intéressant lorsque les tensions d'entrée et de sortie sont proches, à titre d'exemple (230V/115V).

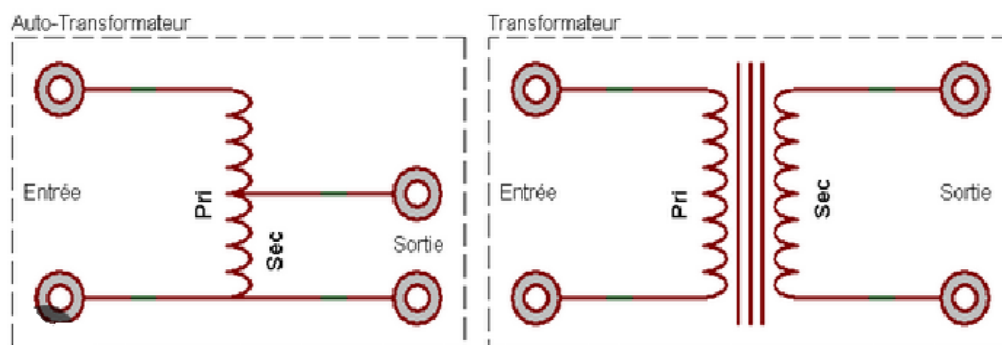


Figure 3.9 Schéma symbolique d'un autotransformateur. Pri indique le primaire; sec le secondaire

### 3.12.2- Les transformateurs de puissance

Les transformateurs de distribution dont la tension d'au moins une des phases dépasse 1 000 V sont considérés comme des transformateurs de puissance. Leur rôle est essentiel dans le réseau électrique pour permettre de transporter l'électricité sur de longues distances. De par leur haut niveau de tension, ils répondent à des contraintes spécifiques notamment au niveau de l'isolation. Leur fiabilité et leur durée de vie doivent être particulièrement élevées voir figure 3.10).



Figure 3.10 les transformateurs de puissance

### 3.12.3- Transformateur variable - variac - alternostat

Comme le montre la figure 3.11, il s'agit d'une variété d'autotransformateurs, puisqu'il ne comporte qu'un seul bobinage. La dérivation de sortie du secondaire peut se déplacer grâce à un contact glissant sur les spires du primaire.

Un « variac », ou autotransformateur variable est constitué d'un noyau d'acier toroïdal, d'une bobine de cuivre en une seule couche et d'un balai carbone. En faisant varier la position du balai sur la bobine on fait varier de manière proportionnelle le rapport de l'autotransformateur. Il présente l'intérêt, par rapport à un rhéostat, de produire beaucoup moins de pertes Joule et sa tension au secondaire dépend beaucoup moins de la charge. La présence d'un fusible entre le secondaire et la charge est indispensable pour éviter, dans le cas où la tension au secondaire et l'impédance de la charge sont faibles, de brûler les spires. On a en effet, dans ce cas, quasiment un court-circuit réparti sur très peu de spires [18]



Figure 3.11 Autotransformateur à rapport variable

### 3.12.4- Transformateur d'isolement

Le transformateur d'isolement est uniquement destiné à créer un isolement électrique entre plusieurs circuits pour des raisons bien souvent de sécurité ou de résolution de problèmes techniques. Tous les transformateurs à enroulement primaire isolé du secondaire devraient être considérés comme des transformateurs d'isolement ; toutefois, en pratique, ce nom désigne des transformateurs dont la tension de sortie a la même valeur efficace que celle de l'entrée.

Ces transformateurs ont presque le même nombre de spires au primaire et au secondaire : celui du secondaire est souvent très légèrement supérieur au nombre de spires du primaire afin de compenser la faible chute de tension en fonctionnement ; en théorie, les sections de fil au primaire et au secondaire sont identiques car l'intensité des courants est la même, mais en pratique l'enroulement intérieur, proche du noyau, a une section supérieure. Sa position diminue en effet sa capacité à évacuer la chaleur produite.

Ils sont, par exemple, largement utilisés dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut qui y apparaîtrait n'engendre des dysfonctionnements dans une autre salle. Un autre intérêt est de changer de régime de neutre (cas d'utilisation de matériel informatique et/ou d'équipements électroniques sensibles dans une installation IT).

### 3.12.5- Transformateur de courant

Ce type de transformateur, appelé aussi transformateur d'intensité, est dédié à l'adaptation des courants mis en jeu dans des circuits différents. Un tel transformateur autorise la mesure des courants alternatifs élevés. Il possède une spire au primaire, et plusieurs spires secondaires, le rapport de transformation permet l'usage d'un ampèremètre classique pour mesurer l'intensité au secondaire. L'intensité au primaire pouvant atteindre plusieurs kilo-ampères (kA).

L'opération de ce type de transformateurs est différente à celle du transformateur de puissance, car l'enroulement primaire compte peu de spires, par conséquent la chute de tension est négligeable. Le secondaire comporte un grand nombre de spires connectées à un ampèremètre de faible impédance. Cela constitue approximativement un circuit court-circuité.  $V_2$  est très faible, le courant est standardisé de 1 à 5A (voir figure 3.12).

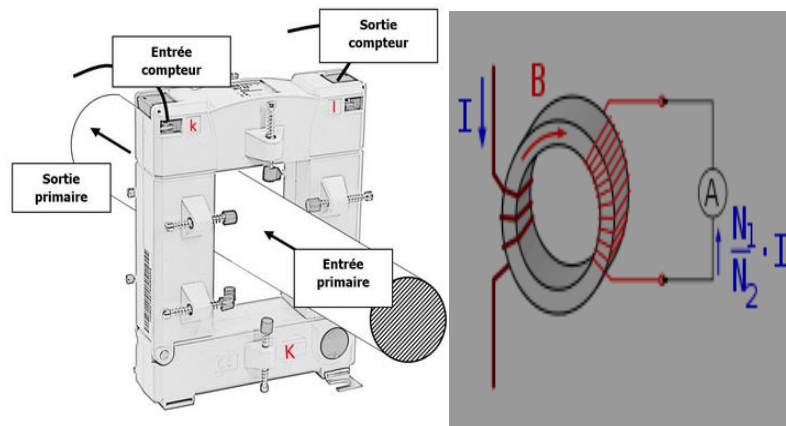


Figure 3.12 Présentation réelle et schématique d'un transformateur de courant

### 3.12.6- Transformateur de tension

Ce transformateur est l'un des moyens de mesure des tensions alternatives élevées. Il s'agit d'un transformateur qui a la particularité d'avoir un rapport de transformation étalonné avec précision, mais prévu pour ne délivrer qu'une très faible charge au secondaire, correspondant à un voltmètre. Le rapport de transformation permet de mesurer des tensions primaires en kilovolts (kV) dans les réseaux HTA et HTB (voir figure 3.13 ci-dessous).



Figure 3.13 Transformateur de tension

### 3.13- Plaque signalétique

Les tensions indiquées sur la plaque signalétique sont la valeur nominale  $V_{1n}$  de la tension au primaire et la valeur efficace de la tension à vide  $V_{20}$  de la tension au secondaire. Il est

également indiqué la puissance apparente nominale  $S_n$  ainsi que la fréquence nominale  $f$  d'utilisation du transformateur, facteur de puissance  $\cos\phi_2$ . La plaque signalétique permet de calculer rapidement les grandeurs n'y figurant pas à l'aide des relations vues précédemment. La figure 3.13 nous montre un exemple de plaque signalétique d'un transformateur triphasé de 400Kva



| France Transfo          |               | Schneider Electric |                         |
|-------------------------|---------------|--------------------|-------------------------|
| TRANSFORMATEUR TRIPHASE |               | 50 Hz              | Réf. de conformité      |
| Conforme à              |               | Année 2003         |                         |
| 400                     | kVA           | Nr 53727JF-2       | Isolément HT KV 125-50  |
| Tension de c/c 4,00%    |               | Couplage Dyn11     |                         |
| Haute tension           |               | Basse tension      |                         |
| Tensions                | pos 1 20500 V | pos 2 20000 V      | pos 3 19500 V           |
|                         |               | 410 V              |                         |
|                         |               |                    | Nature enroul. ALU      |
|                         |               |                    | Refroidissement ONAN    |
|                         |               |                    | Diélectrique HUILE      |
|                         |               |                    | Masse diét. 240 kg      |
|                         |               |                    | Masse à découper 675 kg |
|                         |               |                    | Masse totale 1150 kg    |
|                         |               |                    | Ambiante 40 °C          |
| Courants                | 11.5 A        | 563.3 A            |                         |

Figure 3.14 Plaque signalétique d'un transformateur triphasé de 400KVA

### 3.14- Transformateur triphasé

#### 3.14.1- Utilité

Le transformateur triphasé joue un rôle fondamental pour le transport et la distribution de l'énergie électrique. Le transport de cette dernière ne peut être économique qu'en haute tension (ex 400Kv). Les centrales de production de l'énergie électrique que ce soit hydroélectriques, thermique ou nucléaire, ont une tension de sortie relativement basse (ex 24Kv). L'élévation de la tension est assurée par des transformateurs élévateurs triphasés.

Dans les réseaux électriques triphasés, on pourrait parfaitement envisager d'utiliser 3 transformateurs, un par phase. Dans la pratique, l'utilisation de transformateurs triphasés regroupant les trois phases dans un seul appareil est généralisée : cette solution permet la conception de transformateurs bien moins coûteux, avec en particulier des économies au niveau du circuit magnétique (voir la figure 3.15). En fait, les transformateurs monophasés ne sont guère utilisés, sauf pour de très grosses puissances apparentes (typiquement supérieures à 500 MVA), où le transport d'un gros transformateur triphasé est problématique et incite à l'utilisation de 3 unités physiquement indépendantes.



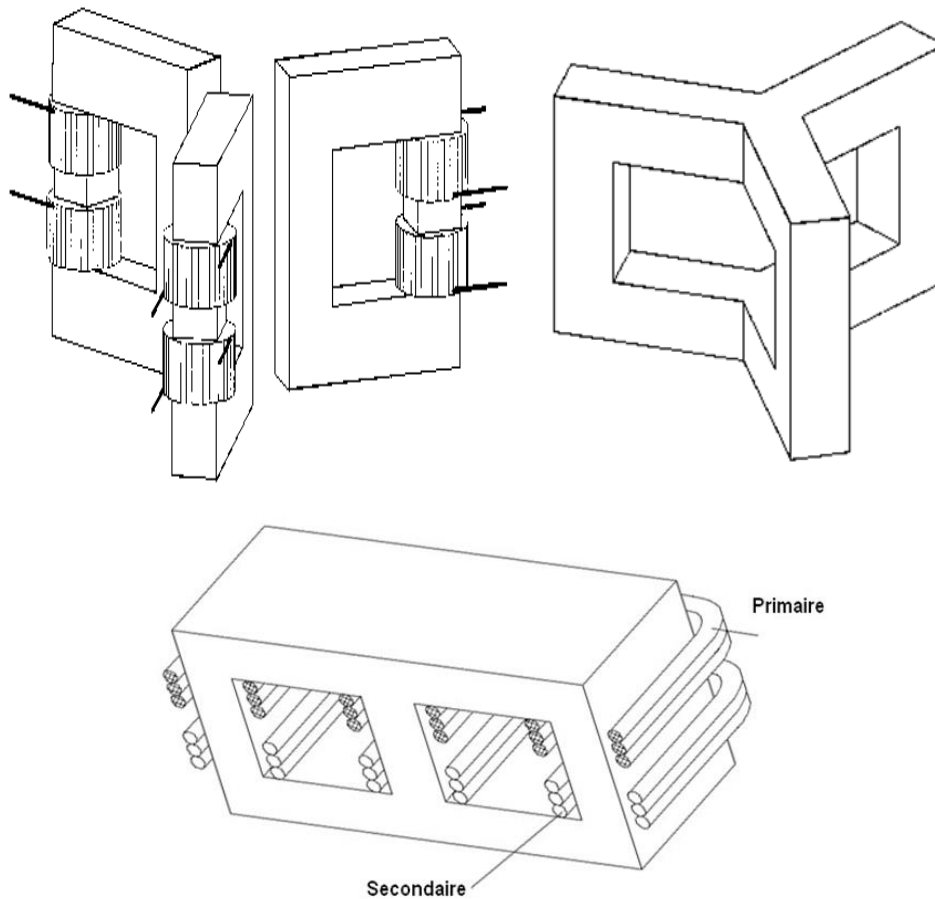


Figure 3.15 Schématisation de trois transformateurs monophasés  
à la place d'un seul transformateur triphasé

L'énergie fournie aux consommateurs est le plus souvent triphasée, car elle permet l'utilisation des moteurs triphasés qui s'avèrent plus performant et mieux adaptés aux secteurs industriels. Ceci nécessite l'emploi des transformateurs triphasés dans la distribution électrique. La tension distribuée aux particuliers est le plus souvent normalisée à 220/380v (soit 380 entre deux phases et 220 entre phase et neutre). Cette tension pourrait être beaucoup plus élevée pour les industriels.

### 3.14.2- Modes de connexion des transformateurs triphasés et groupes de couplage

Sur chacune des colonnes sont disposés un enroulement primaire et un enroulement secondaire. Les trois enroulements primaires peuvent être couplés en triangle ou en étoile. Les trois enroulements secondaires peuvent être couplés en triangle, en étoile ou en Zig-Zag. Dans ce dernier cas le bobinage secondaire est constitué de deux bobines comportant chacune une moitié des spires secondaires.

Chaque mode de couplage est symbolisé par une lettre : **étoile : Y ou y; triangle: D ou d; Zigzag: z**. Les systèmes triphasés de tension sont : " triangle " (D ou d) et " étoile " (Y ou y). La

première lettre de l'indice de couplage est toujours en majuscule et indique le système triphasé à tension la plus élevée ; la deuxième lettre est en minuscule et indique le système à tension la plus basse. Dans le système " étoile ", le " neutre " (point central de l'étoile) peut être sorti au bornier du transformateur : ceci est indiqué par la présence de la lettre N (ou n) dans l'indice de couplage. Il existe également le couplage zig-zag (z), utilisé majoritairement au secondaire ; il possède un neutre. Ce couplage permet, lors de la perte d'une phase au primaire, d'avoir au secondaire une tension pratiquement identique sur les trois phases.

Il en résulte six combinaisons possibles de groupe de couplage : **Y-y ou Y-d ou Y-z ou D-y ou D-d ou D-z**, pour le cas où le transformateur est abaisseur ; **d-D ou d-Y ou d-Z ou y-D ou y-Y ou y-Z**, pour le cas où le transformateur est élévateur.

Rappelons que la lettre majuscule correspond à la plus haute tension (le plus souvent le primaire) et la lettre minuscule à la plus basse tension. Le couplage Zig-zag est utilisé en cas de surcharge déséquilibrée importante (transformateur de distribution) ; ce couplage est réalisé en usine et n'est pas modifiable. Il possède la particularité de répartir la surcharge sur deux phases lors d'un déséquilibre.

Rappelons aussi que repérage de la plaque à bornes est : bornes **HT** sont repérées par les lettres capitales **A, B et C** et les bornes **BT** par les minuscules **a, b et c**. Dans le cas où le neutre est disponible et distribué, on trouve une borne supplémentaire comme c'est illustré sur la figure 3.16.

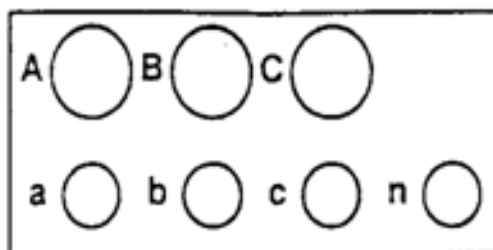


Figure 3.16 Plaque à bornes d'un transformateur triphasé

### 3.14.3- Indice de couplage

L'indice de couplage est la caractéristique d'un transformateur triphasé pour indiquer le type de couplage réalisé au primaire et au secondaire, ainsi que le déphasage entre la tension primaire et la tension secondaire. Enfin, l'indice de couplage est simplifié par un système dit « indice horaire » qui donne, par décalage de  $30^\circ$ , le déphasage horaire en 12èmes de tour (inspiré de la montre) entre le primaire et le secondaire du transformateur (ex.: 11 =  $11 \times 30^\circ = 330^\circ$  en sens horaire ou  $30^\circ$  dans le sens antihoraire).

Par exemple, un indice de couplage « Dyn11 » définit donc un transformateur dont : le système triphasé de tension élevé est en « triangle » ; le système triphasé de tension basse est

en « étoile » avec neutre sorti (indiqué par le « n ») et le décalage entre les deux systèmes est de  $330^\circ (= -30^\circ$  ou bien  $11 \times 30^\circ)$ .

Effectuer les connexions en étoile ou en triangle, permuter ou non les phases, inverser ou non le sens des enroulements permet d'introduire un retard des grandeurs secondaires par rapport aux grandeurs primaires qui peut être n'importe quel multiple de  $30^\circ$ . L'indice horaire est un système de reconnaissance de la position temporaire et spatiale des enroulements primaires par rapport à ceux du secondaire (voir figure 3.17).

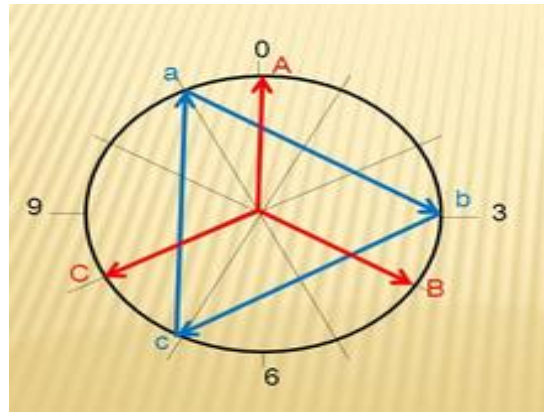


Figure 3.17 Indice horaire de couplage d'un transformateur triphasé

**Prenons un 1<sup>er</sup> exemple : Couplage  $Yy_0$**

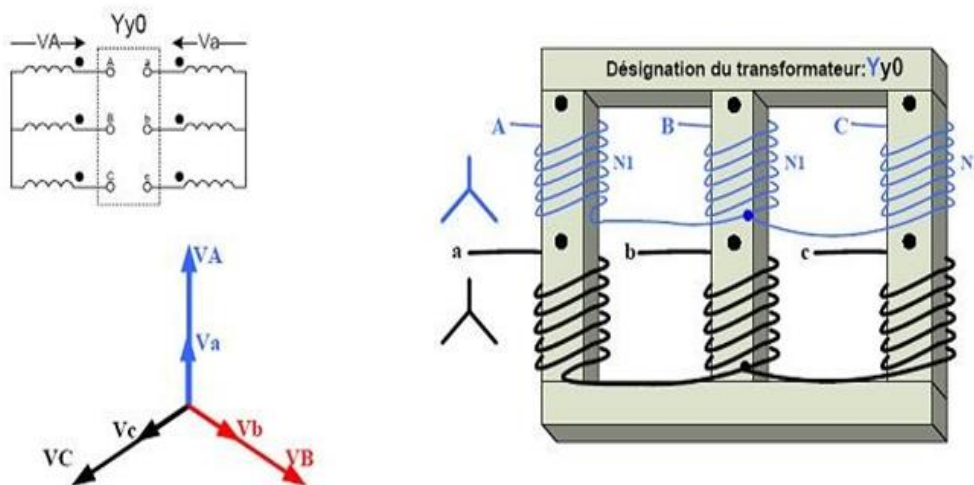


Figure 3.18 Schéma de connexion et diagramme vectoriel du couplage  $Yy_0$

Les avantages de ce mode de couplage sont : l'alimentation en quatre fils permettant d'avoir deux sortes de tension (tension simple et tension composée) et servant à promouvoir le système de sécurité et le deuxième avantage est l'économie dans les matériaux d'isolation. Mais il n'est pas recommandé pour les charges asymétriques.

**Un 2<sup>eme</sup> exemple : Triangle-étoile -11h (D-y<sub>11</sub>)**

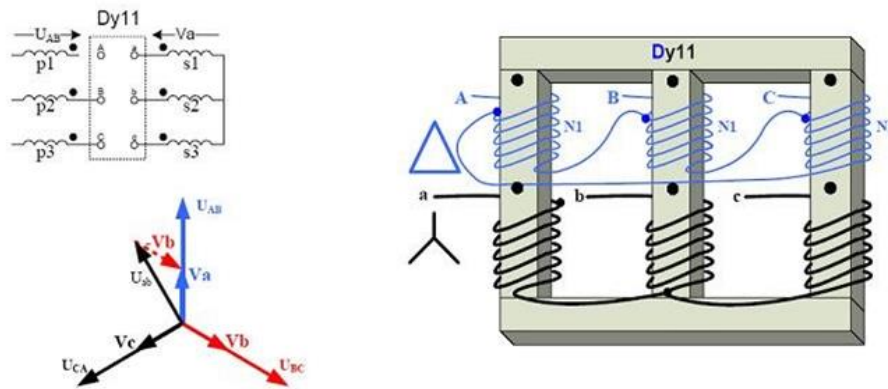


Figure 3.19 Schéma de connexion et diagramme vectoriel du couplage Dy<sub>11</sub>

C'est la connexion la plus utilisée et la plus efficace. Ce transformateur peut être utilisé comme élévateur ou comme abaisseur. Ses avantages se résument en sa capacité de stabiliser le neutre de l'étoile et son utilisation aussi bien pour les charges symétriques que pour les charges asymétriques.

Tab 3.1 Tableau résumant Indice horaire suivant le couplage

|            |            |             |             |
|------------|------------|-------------|-------------|
| <p>Yy0</p> | <p>Dd0</p> | <p>Dy11</p> | <p>Yd11</p> |
| <p>Yy6</p> | <p>Dd6</p> | <p>Dy5</p>  | <p>Yd5</p>  |
| <p>Yz5</p> | <p>Dz6</p> | <p>Dz10</p> | <p>Yz11</p> |

Il est bien évident qu'il reste encore deux combinaisons de couplage qui sont : l'étoile-triangle et le triangle-triangle sans oublier la connexion zigzag qui malgré sa complexité et son utilisation de trop de matériaux elle a l'avantage de la réduction des harmoniques

supérieurs et de rendre symétrique l'asymétrie du primaire lorsqu'on alimente une charge asymétrique.

### 3.15- Branchement des transformateurs en parallèle

Pour brancher les transformateurs triphasés en parallèle, il faut que :

- Les tensions respectives doivent être égales
- Les groupes de couplage doivent être les mêmes
- Les tensions de court-circuit doivent être égales

### 3.16- Exercices corrigés sur les Transformateur

#### Exercice 01 :

La puissance apparente d'un transformateur monophasé 5,0 kV / 230 V ; 50 Hz est  $S = 21$  kVA.

La section du circuit magnétique est  $s = 60 \text{ cm}^2$  et la valeur maximale du champ magnétique  $B = 1,1 \text{ T}$ . L'essai à vide a donné les résultats suivants :  $U_1 = 5\,000 \text{ V}$  ;  $U_{20} = 230 \text{ V}$  ;  $I_{10} = 0,50 \text{ A}$  et  $P_{10} = 250 \text{ W}$ . L'essai en court-circuit avec  $I_{2CC} = I_{2n}$  a donné les résultats suivants :  $P_{1CC} = 300 \text{ W}$  et  $U_{1CC} = 200 \text{ V}$ .

- 1- Calculer le nombre de spires  $N_1$  au primaire.
- 2- Calculer le rapport de transformation  $m$  et le nombre  $N_2$  de spires au secondaire.
- 3- Quel est le facteur de puissance à vide de ce transformateur ?
- 4- Quelle est l'intensité efficace du courant secondaire  $I_{2n}$  ?
- 5- Déterminer les éléments  $R_S$  ;  $Z_S$  et  $X_S$  de ce transformateur.
- 6- Calculer le rendement de ce transformateur lorsqu'il débite un courant d'intensité nominale dans une charge inductive de facteur de puissance 0,83.

#### Exercice :02

L'étude d'un transformateur monophasé a donné les résultats suivants : Mesure en continu des résistances des enroulements à la température de fonctionnement :  $r_1 = 0,2 \Omega$  et  $r_2 = 0,007 \Omega$ .

Essai à vide :  $U_1 = U_{1n} = 2\,300 \text{ V}$  ;  $U_{20} = 240 \text{ V}$  ;  $I_{10} = 1,0 \text{ A}$  et  $P_{10} = 275 \text{ W}$ .

Essai en court-circuit :  $U_{1CC} = 40 \text{ V}$  ;  $I_{2CC} = 200$ .

- 1- Calculer le rapport de transformation  $m$ .
- 2- Montrer que dans l'essai à vide les pertes Joule sont négligeables devant  $P_{10}$
- 3- Déterminer la valeur de la résistance ramenée au secondaire  $R_S$ .
- 4- Calculer la valeur de  $P_{1CC}$ .

- 5- Déterminer  $X_s$ .
- 6- Déterminer par la méthode de votre choix, la tension aux bornes du secondaire lorsqu'il débite un courant d'intensité  $I_2 = 180$  A dans une charge capacitive de facteur de puissance 0,9.
- 7- Quel est alors le rendement.

**Exercice 03 :**

Un transformateur monophasé de section  $S=20$  cm<sup>2</sup>, alimenté par une tension de valeur efficace 400 V et de fréquence 50 Hz, présente une chute de tension secondaire de 3 % quand il alimente une charge sous  $V_2= 1180$  V. On donne l'induction maximale dans le noyau  $B_{\max}=1.2$  T et on demande de déterminer :

- 1) Le rapport de transformation.
- 2) Les nombres de spires primaires et secondaires  $N_1$  et  $N_2$

**Exercice 04 :**

Un transformateur monophasé a réalisé les performances suivantes :

**Essai à vide :**

Sous tension nominale  $V_{1N}=2200$  V, on relève :  $V_{20}=440$  V ;  $I_{10}=0.8$  A et  $P_{10}=550$  W

**Essai en court-circuit :**

Sous  $V_{1cc}=300$  V on note :  $I_{2cc}=10$  A et  $P_{1cc}=450$  W

**Essai en charge :**

Sous tension nominale et sur charge inductive  $\cos\Phi_2=0.8$  on relève un courant au secondaire  $I_2= 8$ A,

On demande de déterminer :

- 1) Les composantes du courant magnétisant
- 2) Les éléments de la branche magnétisante  $R_m$  et  $X_m$
- 3) La résistance et la réactance totale ramenées au secondaire  $R_s$  et  $X_s$
- 4) La tension au secondaire
- 5) Le rendement

**Exercice 05 :**

Un transformateur monophasé de masse  $M=42$  Kg ; de section des noyaux  $S=40$  cm<sup>2</sup> de coefficient de qualité de tôles  $q=1.5$  W/Kg (à 1T et 50 Hz) ; possède 300 spires au primaire.

Dans un essai en charge sous tension nominale  $V_{1N}=400$  V on relève au point caractérisé par ( $I_2= 5$ A,  $\cos\Phi_2=0.8$ ) un rendement maximal  $\eta_{\max}=88.89$  % et une chute de tension  $\Delta V=8\%$ .

On demande de déterminer :

- 1) L'induction Maximale dans le Noyau  $B_{max}$  ;
- 2) Le coefficient de qualité de tôles à l'induction de travail  $q$  ;
- 3) Les pertes ferromagnétiques  $P_{fer}$  ;
- 4) La tension aux bornes du secondaire en charge  $V_2$  puis à vide  $V_{20}$  ;
- 5) Le rapport de transformation ;
- 6) Le courant de court-circuit, sous  $V_{1CC}=80$  V ;
- 7) Le rendement au point caractéristique par ( $I_2= 10A$ ,  $\cos\Phi_2=0.7$ ) ;
- 8) Pour quelle valeur de  $\cos\Phi_2$  la chute de tension  $\Delta V$  est nulle ?

### Correction de l'exercice 01

1- En utilisant le théorème de Boucherot :  $U_1 = 4,44 N_1 sfB$ , on en déduit :

$$N_1 = \frac{U_1}{4,44 sfB} = \frac{5000}{4,44 \times 60 \cdot (10^{-2})^2 \times 50 \times 1,1} = 3413 \text{ spires}$$

2-  $m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{230}{5000} = 0,046$  et  $m = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow N_2 = m \cdot N_1 = 0,046 \times 3413 = 157$  spires.

3-  $P_{10} = P_F$  et  $\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{U_1 \cdot I_{10}} = \frac{250}{5000 \times 0,5} = 0,1$

4-  $S = U_{1n} \cdot I_{1n} = U_{20} \cdot I_{2n}$  soit  $I_{2n} = \frac{S}{U_{20}} = \frac{21 \cdot 10^3}{230} = 91,3A$ .

5-  $R_s = \frac{P_{1CC}}{I_{2CC}^2} = \frac{300}{91,3^2} = 36m\Omega$

$$Z_s = \frac{m \cdot U_{1CC}}{I_{2CC}} = 0,1\Omega$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{0,1^2 - 0,036^2} = 94m\Omega$$

7- Pour déterminer le rendement, il faut déjà déterminer la tension  $U_2$  aux bornes de la charge soit en utilisant la méthode graphique ( $\underline{U}_{2V} = R_s \cdot \underline{I}_2 + jX_s \cdot \underline{I}_2 + \underline{U}_2$ ) soit en utilisant l'expression approchée de la chute de tension :

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

$$\Delta U_2 = 36 \cdot 10^{-3} \times 91,3 \times 0,83 + 94 \cdot 10^{-3} \times 91,3 \times \sin(\cos^{-1} 0,83) = 7,51V$$
 . On en déduit

$U_2$  :

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 = 230 - 7,51 = 222,5V$$
 . On calcule ensuite  $P_2$  et  $P_1$  :

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 222,5 \times 91,3 \times 0,83 = 16,86kW$$
 ;

$$P_1 = P_2 + P_F + P_C = 16,86 \cdot 10^3 + 250 + 300 = 17,41kW \text{ et } \eta = \frac{P_2}{P_1} = 96,8\%$$

**Correction de l'exercice 02**

$$1- m = \frac{U_{20}}{U_1} = \frac{240}{2300} = 0,104.$$

$$2- P_{10} = P_F + r_1 \cdot I_{10}^2. \text{ On montre que } r_1 \cdot I_{10}^2 \ll P_F \text{ donc } P_{10} = P_F.$$

$$3- R_s = r_2 + m^2 \cdot r_1 = 0,007 + 0,104^2 \cdot 0,2 = 9,18 \cdot 10^{-3} \Omega.$$

$$4- P_{1CC} = R_s \cdot I_{2CC}^2 = 9,18 \cdot 10^{-3} \times 200^2 = 367,1W.$$

$$5- \text{On calcule en premier } Z_s. Z_s = \frac{m \cdot U_{1CC}}{I_{2CC}} = \frac{0,104 \times 40}{200} = 20 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{(20 \cdot 10^{-3})^2 - (9,18 \cdot 10^{-3})^2} = 17,7m\Omega$$

$$6- \Delta U_2 = U_{20} - U_2 = R_s \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X_s \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 \text{ avec } \varphi_2 < 0 \text{ car charge capacitive.}$$

$$\Delta U_2 = 9,18 \cdot 10^{-3} \times 180 \times 0,9 - 17,7 \cdot 10^{-3} \times 180 \times \sin(\cos^{-1} 0,9) = 0,93V$$

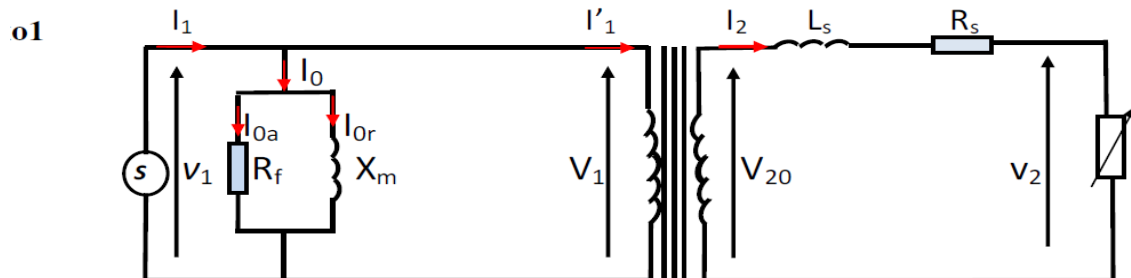
$$U_2 = U_{20} - \Delta U_2 = 240 - 0,93 = 239,9V$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = 239,9 \times 180 \times 0,9 = 38,86kW$$

**!! Ici, le courant  $I_2$  est différent que  $I_{2CC}$  !!**

$$P_1 = P_2 + P_F + P_C = P_2 + P_F + R_s \cdot I_2^2 = 38,86 \cdot 10^3 + 275 + 9,18 \cdot 10^{-3} \times 180^2 = 39,44kW$$

$$\eta = 98,5\%$$

**Correction de l'exercice 03**

1) La chute de tension

$$\Delta V = V_{20} - V_2 \text{ en volt}$$

$$\Delta V = V_{20} - V_2 = R_s \cdot I_2 \cos \varphi_2 + X_s \cdot I_2 \sin \varphi_2 \text{ en volt}$$

$$\Delta V = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \text{ sans unité en \%} \Rightarrow V_{20} = \frac{V_2}{1 - \Delta v} = \frac{1180}{1 - 0,03} = 1216 V$$

$$\text{Le rapport de transformation } m = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{1216}{400} = 3,04$$



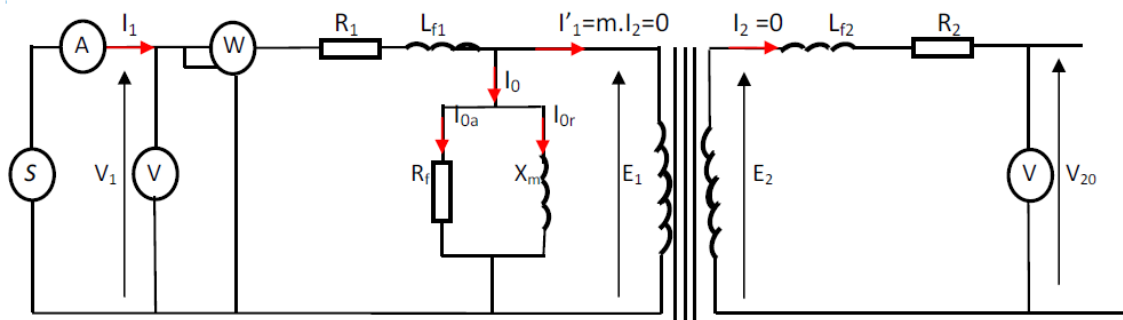
## 2) La formule de Kapp

$$E_1 = N_1 \omega \Phi = N_1 \omega \frac{\Phi_{\max}}{\sqrt{2}} = N_1 2\pi f \frac{\Phi_{\max}}{\sqrt{2}} = N_1 2\pi f \frac{B_{\max} S}{\sqrt{2}} = 4.44 N_1 f S B_{\max} \approx V_1$$

$$\Rightarrow N_1 = \frac{V_1}{4.44 * f * B_{\max} * S} = \frac{400}{4.44 * 50 * 1.2 * 20 * 10^{-4}} = 750 \text{ spires}$$

$$m = \frac{N_2}{N_1} \Rightarrow N_2 = m * N_1 = 3 * 750 = 2250 \text{ spires}$$

### Correction de l'exercice 04

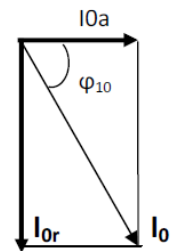


#### 1) Les Composantes du courant magnétisant

$$P_{10} = V_1 I_{10} \cos \varphi_{10} = V_1 I_{0a} \Rightarrow I_{0a} = P_{10} / V_1 = 550 / 2200 = 0.25 \text{ A}$$

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_{0a} + \vec{I}_{0r} \quad \text{avec} \quad I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0 \quad \text{et} \quad I_{0r} = I_0 \sin \varphi_0$$

$$\Rightarrow I_{0r} = \sqrt{I_0^2 - I_{0a}^2} = \sqrt{0.8^2 - 0.25^2} = 0.76 \text{ A}$$



#### 2) Les éléments de la branche magnétisante

$$V_1 = R_f * I_{0a} = X_m * I_{0r} \Rightarrow R_f = \frac{V_1}{I_{0a}} = \frac{2200}{0.25} = 8.8 \text{ K}\Omega$$

$$X_m = \frac{V_1}{I_{0r}} = \frac{2200}{0.76} = 2.894 \text{ K}\Omega$$

#### 3) La résistance et la réactance totale ramenées au secondaire Rs et Xs

$$m = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{440}{2200} = 0.2$$

$$P_{1cc} = P_{\text{fer}} + P_{\text{joules}} \approx P_{\text{joules}} = R_s I_{2cc}^2 \Rightarrow R_s = P_{1cc} / I_{2cc}^2 = 450 / 10^2 = 4.5 \Omega$$

$$m V_{1cc} = Z_s I_{2cc} \Rightarrow Z_s = m * V_{1cc} / I_{2cc} = 0.2 * 300 / 10 = 6 \Omega$$

$$Z_s = R_s + j X_s \Rightarrow X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_s^2} = \sqrt{6^2 - 4.5^2} = 3.97 \Omega$$

#### 4) La tension au secondaire

La chute de tension

$$\Delta V = R_s * I_2 \cos \varphi_2 + X_s * I_2 \sin \varphi_2 = 4.5 * 8 * 0.8 + 3.97 * 8 * 0.6 = 45.9 \text{ V}$$

La tension secondaire

$$V_2 = V_{20} - \Delta V = 440 - 45.9 = 394.1 \text{ V}$$

5) Le rendement

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_1 I_1 \cos \phi_1} = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + P_{fer} + P_J} = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + P_{fer} + R_s I_2^2}$$

$$P_{fer} = \text{constante} = P_{10} = 450 \text{ W}$$

$$P_J = R_s I_2^2 = 4.5 * 8^2 = 288 \text{ W}$$

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + P_{fer} + R_s I_2^2} = \frac{394.1 * 8 * 0.8}{394.1 * 8 * 0.8 + 450 + 288} = 0.75$$

### Correction de l'exercice 04

$$1) V_1 \simeq 4.44 N_1 f S B_{max} \Rightarrow B_{max} = \frac{V_1}{4.44 N_1 f S} = \frac{400}{4.44 * 50 * 300 * 40 * 10^{-4}} = 1.5 \text{ T}$$

$$2) \left. \begin{array}{l} q = 1.5 \text{ W/kg} \longrightarrow (1 \text{ T})^2 \\ q' = ? \longrightarrow (B_{max})^2 \end{array} \right\}$$

$$q' = \frac{q * B_{max}^2}{1^2} = \frac{1.5 * 1.5^2}{1} = 3.375 \text{ W/kg}$$

$$3) P_{fer} = P_{10} = M * q' = 42 * 3.375 = 141.75 \text{ W}$$

4) Le rendement Maximal  $\Rightarrow P_{fer} = P_J$

$$\eta_{max} = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + P_{fer} + P_J} = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + 2 * P_{fer}} = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + 2 * P_J}$$

$$V_2 = \frac{2 * P_{fer} * \eta_{max}}{I_2 \cos \phi_2 (1 - \eta_{max})} = \frac{2 * 141.75 * 0.8889}{5 * 0.8 (1 - 0.8889)} = 567 \text{ V}$$

$$5) \Delta V = \frac{V_{20} - V_2}{V_{20}} \Rightarrow V_{20} = \frac{V_2}{(1 - \Delta V)} = \frac{567}{(1 - 0.08)} = 616.3 \text{ V}$$

$$m = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{616.3}{400} = 1.54$$

$$6) \eta = \eta_{max} \Rightarrow P_{fer} = P_J = P_{10} = R_s * I_2^2 \Rightarrow R_s = \frac{P_{10}}{I_2^2} = \frac{141.75}{5^2} = 5.67 \Omega$$

$$\Delta V = V_{20} - V_2 = 616.3 - 567 = 49.7 \text{ V} = R_s * I_2 \cos \phi_2 + X_s * I_2 \sin \phi_2$$

$$X_s = \frac{\Delta V - R_s * I_2 * \cos \phi_2}{I_2 * \sin \phi_2} = \frac{49.7 - 5.67 * 5 * 0.8}{5 * 0.6} = 8.87 \Omega$$

$$Z_s = \sqrt{X_s^2 + R_s^2} = 10.53 \Omega$$

$$m \cdot V_{1cc} = Z_s \cdot I_{2cc} \Rightarrow I_{2cc} = \frac{m \cdot V_{1cc}}{Z_s} = 11.68 \text{ A}$$

7) Le rendement au point caractéristique par ( $I_2 = 10 \text{ A}$ ,  $\cos \Phi_2 = 0.7$ ) :

$$P_{\text{fer}} = \text{constante} = P_{10} = 141.75 \text{ W}$$

$$P_j = R_s I_2^2 = 5.67 \cdot 10^2 = 567 \text{ W}$$

$$\Delta V = R_s \cdot I_2 \cos \varphi_2 + X_s \cdot I_2 \sin \varphi_2 = 5.67 \cdot 10 \cdot 0.7 + 8.87 \cdot 10 \cdot 0.7 = 103 \text{ V}$$

$$V_2 = V_{20} - \Delta V = 616.3 - 103 = 513.3 \text{ V}$$

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \varphi_2}{V_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{fer}} + R_s I_2^2} = \frac{513.3 \cdot 10 \cdot 0.7}{513.3 \cdot 10 \cdot 0.7 + 141.75 + 567} = 0.835$$

8)  $\Delta V = R_s \cdot I_2 \cos \varphi_2 + X_s \cdot I_2 \sin \varphi_2 = 0 \Rightarrow \varphi < 0$  et  $\sin \varphi_2 < 0$

$$R_s \cdot I_2 \cos \varphi_2 = -X_s \cdot I_2 \sin \varphi_2$$

$$\text{tg} \varphi_2 = -\frac{R_s I_2}{X_s I_2} \Rightarrow \varphi_2 = -32.58 \text{ charge capacitive}$$

## Chapitre 4 – Machines à courant alternatif

### 4.1- Introduction

Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants triphasés, utilisés par les fournisseurs et distributeurs de l'énergie électrique. Par contre Pour les applications de faible et moyenne puissance (quelques kilowatts), le réseau monophasé standard suffit amplement et on pourrait même utiliser les moteurs universels qui peuvent fonctionner en courant continu comme en alternatif.

Les machines à courant alternatif sont les plus fréquemment utilisées pour dynamiser l'industrie contemporaine. Effectivement elles profitent dès leur création d'une multitude d'avantages comparées aux machines à courant continu à savoir : robustesse, simplicité, bon marché, prix réduit d'entretien et réparation, efficacité, rendement élevé même lors de fonctionnement dans des conditions difficiles, large gamme de puissance etc.

Les forces électromagnétiques d'attraction ou de répulsion au niveau de l'entrefer des machines électriques, sont dues à l'interaction des champs magnétiques du stator et du rotor (ce dernier appelé communément « réaction d'induit »). Le champ magnétique statorique dans les machines à courant alternatif est tournant. Selon que la vitesse rotorique égale ou non la vitesse du champ tournant, les machines sont dites respectivement synchrones ou asynchrones. Dans le présent chapitre, nous étudierons les principes fondamentaux de ces deux types de machines.

### 4.2- Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un moteur à courant alternatif repose sur l'induction d'un courant dans les conducteurs lorsqu'ils coupent les lignes de force du champ magnétique tournant, d'où le nom de « moteur à induction ». L'action combinée de ce courant induit et du champ magnétique crée un couple électromagnétique sur le rotor.

Supposons une spire ABCD en court-circuit, située dans un champ magnétique  $B$ , et mobile autour d'un axe  $x.y$  (voir figure 4.1). Si nous faisons tourner le champ magnétique dans le sens des aiguilles d'une montre, la spire est soumise à un flux variable et devient le siège d'une force électromotrice induite qui donne naissance à un courant induit (loi de Faraday). D'après la loi de Lenz, le sens du courant est tel qu'il s'oppose par son action électromagnétique à la cause qui lui a donné naissance. Chacun des deux conducteurs est donc soumis à une force  $F$  de Laplace, de sens opposé à son déplacement [19].

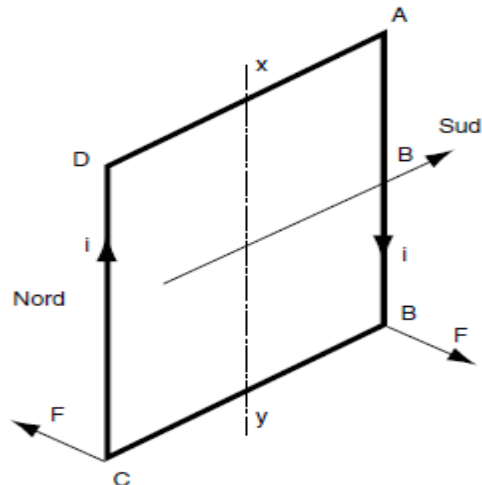


Figure 4.1 Création d'un courant induit dans une spire en court-circuit

La règle des trois doigts de la main droite (Figure 4.2), nous permet d'obtenir facilement le sens de la force  $F$  appliquée. Le sens de l'induction magnétique est indiqué par le pouce, tandis que le majeur indique le sens du courant et l'index le sens de la force magnétomotrice. La spire est donc soumise à un couple de rotation de même sens que le champ dit « champ tournant ». La spire se met donc à tourner selon le couple électromagnétique produit.

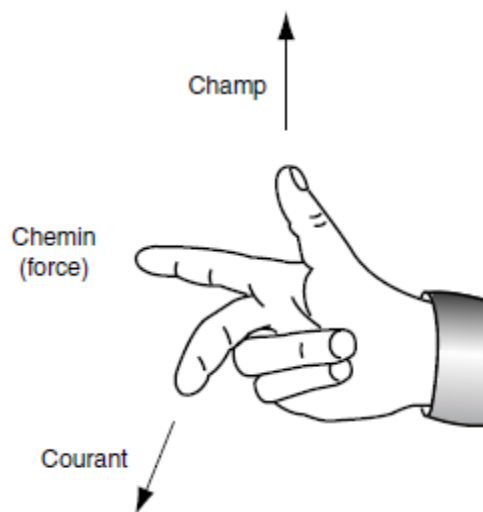


Figure 4.2 Règle des trois doigts de la main droite

Donc, en résumé, une machine électrique alternative triphasée (machine à induction), convertit l'énergie électrique en énergie mécanique (cas d'un moteur), ou inversement (générateur ou alternateur). La conversion de l'énergie électrique en champ magnétique tournant se fait au niveau du stator tandis que le rotor est le siège de la conversion de l'énergie

mécanique. Il est à noter que ces types de machines sont réversibles. Autrement dit, elles peuvent fonctionner en moteur comme elles peuvent fonctionner en génératrices sans rien changer au niveau de la conception ; mais il est communément reconnu que les machines synchrones ont prouvé leur efficacité en tant que génératrices, par contre les machines asynchrones sont le plus souvent utilisées comme moteurs robustes et rentables.

### 4.3- Création du champ tournant

Dans les machines triphasées, le ravitaillement électrique se fait à travers trois enroulements, géométriquement décalés de  $120^\circ$ , alimentés chacun par une des phases d'un réseau triphasé alternatif (voir figure 4.3). Les enroulements produisent chacun un champ magnétique alternatif sinusoïdal tournant.

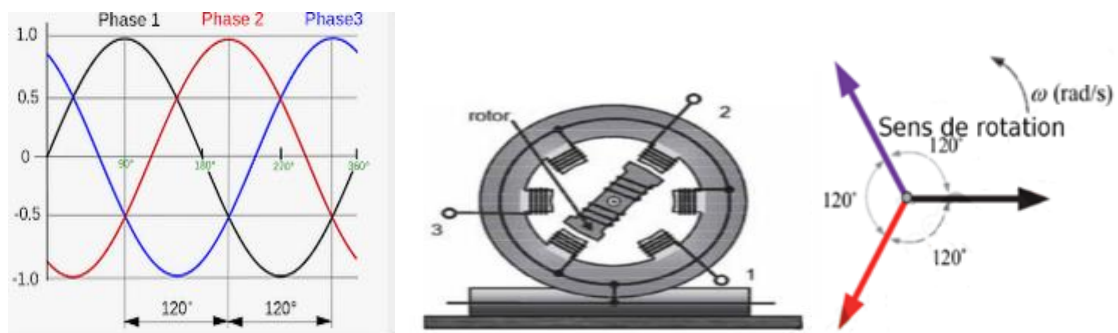


Figure 4.3 Principe d'un moteur asynchrone triphasé

Cas du monophasé : Nous exposons une aiguille aimantée en face d'une bobine à noyau de fer alimenté par une source de tension alternative  $u(t)$  de fréquence fixe ( $f$ ) illustrée à la figure 4.4 présentée ci-dessous.

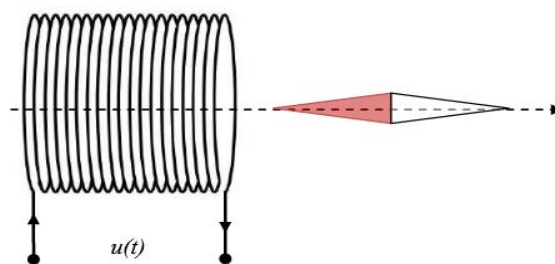


Figure 4.4 Champs générés par action d'un champ monophasé sur une aiguille aimantée

En présence du courant alternatif, l'aiguille aimantée tourne dans un sens et elle continue à tourner à une vitesse égale la fréquence ( $f$ ) de la source d'alimentation en tension électrique. Dans le cas d'un disque métallique au lieu de l'aiguille aimantée, Lancé dans un sens, il continu à tourner dans ce sens à une vitesse inférieure à la fréquence  $f$  à cause de son inertie (c'est ce qu'on appellera désormais l'asynchronisme) .

Cas du triphasé : Le cas dans le triphasé n'est pas différent du monophasé. Si nous alimentons maintenant par une source de tension triphasée ( $u_1, u_2, u_3$ ) équilibrée de fréquence fixe  $f$ , trois bobines identiques dont les axes sont décalés de  $120^\circ$  l'un de l'autre (voir la figure 4.5 présentée ci-dessous).

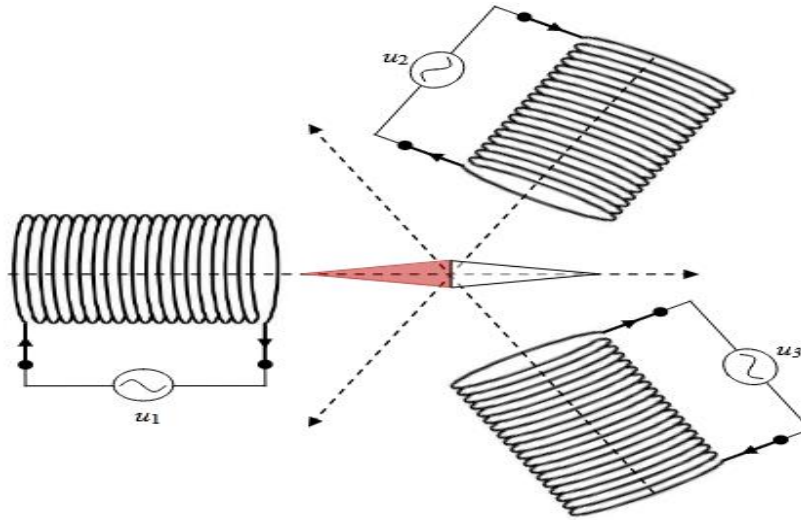


Figure 4.5 Action d'un champ triphasé sur une aiguille aimantée

L'aiguille aimantée se met à tourner spontanément et atteint une fréquence de rotation égale à la fréquence d'alimentation  $f$  ( $n=f$ ). De même que pour le cas d'un disque métallique au lieu de l'aiguille aimantée, le disque se met à tourner à une fréquence de rotation inférieure à la fréquence d'alimentation  $f$  [20].

#### 4.4- Glissement

La notion du glissement se résume comme suit : Le couple électromagnétique ne peut subsister que si et seulement si un courant induit circule dans les spires avec la présence de flux magnétique. Il faut donc qu'il y ait une différence de vitesse entre la spire tournante du rotor et le champ tournant pour qu'un moteur électrique fonctionnant suivant ce principe pour qu'on puisse l'appeler « moteur asynchrone ». La différence entre la vitesse du champ magnétique tournant appelée communément vitesse de synchronisme ( $N_s$ ) et celle du rotor ( $N$ ) est appelée : glissement ( $g$  en %). Il est donc évident que si  $N_s$  et la vitesse rotorique  $N$  s'égalisent (se synchronisent), on est dans le cas d'une machine synchrone.

$$g = \frac{(N_s - N)}{N_s} \cdot 100\%$$

En fonctionnement, la fréquence du courant rotorique s'obtient en multipliant la fréquence d'alimentation par le glissement. Le glissement en régime permanent est variable suivant la

charge du moteur et la tension d'alimentation appliquée. Il est d'autant plus faible que le moteur est peu chargé.

#### 4.5- Vitesse de synchronisme

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles du stator.

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Avec :

$N_s$  : vitesse de synchronisme en tr/min

$f$  : fréquence en Hz,

$p$  : nombre de paires de pôles,

$N$  : vitesse rotorique.

Pour les fréquences industrielles de 50 Hz et 60 Hz et une autre fréquence (100 Hz), les vitesses de rotation du champ tournant, ou vitesses de synchronisme, en fonction du nombre de paires de pôles, sont données dans le tableau suivant.

Tab 4.1 Vitesses de synchronisme fonction du nombre de pôles et de la fréquence du courant

| Nombre de pôles | Vitesse de rotation en tr/min |       |        |
|-----------------|-------------------------------|-------|--------|
|                 | 50 Hz                         | 60 Hz | 100 Hz |
| 2               | 3000                          | 3600  | 6000   |
| 4               | 1500                          | 1800  | 3000   |
| 6               | 1000                          | 1200  | 2000   |
| 8               | 750                           | 900   | 1500   |
| 10              | 600                           | 720   | 1200   |
| 12              | 500                           | 600   | 1000   |
| 16              | 375                           | 540   | 750    |

Dans la pratique il n'est pas possible d'augmenter la vitesse d'un moteur asynchrone en l'alimentant sous une fréquence plus grande que celle pour laquelle il est prévu. Il convient en effet de vérifier si ses conceptions mécanique et électrique sont adaptées et le permettent.

Il est aussi à noter que compte tenu du glissement, les vitesses de rotation en charge des moteurs asynchrones sont inférieures aux vitesses de synchronisme indiquées dans le tableau.



## 4.6- Machines synchrones

### 4.6.1-Qu'est-ce qu'une machine synchrone

La machine synchrone désigne toute machine ayant la vitesse de rotation de l'arbre, égale à la vitesse de rotation du champ magnétique tournant. Le rotor d'une machine synchrone branchée au réseau électrique de fréquence égale à 50 Hz, tourne exactement de manière synchrone avec le champ tournant spécifié par la fréquence de ce réseau.

Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique statorique est généré soit par des aimants permanents, soit par un circuit d'excitation électromagnétique. La position du champ magnétique tournant est alors fixe en face de la position du rotor, ce qui implique en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le champ magnétique tournant du stator et la partie en rotation mécanique (rotor). Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui ont une large gamme de puissance allant de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas et à réluctance variable. Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement identique.

Par exemple, La machine synchrone se distingue de la machine asynchrone dont le rotor est en retard sur le champ tournant en fonctionnement moteur et en avance en fonctionnement générateur. Une autre caractéristique distinctive est que, contrairement à la machine asynchrone, un champ d'excitation supplémentaire est nécessaire pour le fonctionnement.

La machine synchrone peut fonctionner réversiblement en tant que moteur électrique et en tant que générateur . Néanmoins, l'alternateur est une application particulière de la machine synchrone.

Les machines synchrones sont généralement des machines triphasées. Le rotor, à pôles, est alimenté par une source de courant continu ou doté d'aimants permanents.

Il existe deux manières de construire une machine synchrone, soit l'inducteur est tournant soit l'inducteur est fixe. Mais la plupart des machines synchrones sont à induit fixe et inducteur tournant comme le montre la figure II.1.b.

La vitesse de variation du flux magnétique dépend de la fréquence du réseau d'alimentation des enroulements inducteurs. Cette vitesse est fonction d'une part de la vitesse de rotation du rotor et d'autre part du nombre de paires de pôles au stator et au rotor. Pour une fréquence de 50Hz, on associe :

La vitesse de variation du flux magnétique dépend de la fréquence du réseau d'alimentation des enroulements inducteurs.

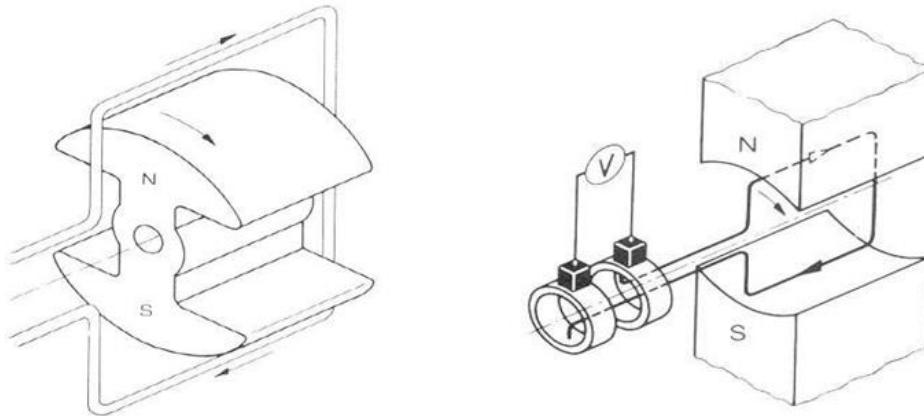


Figure 4.6 Principe de machine à induit fixe et inducteur tournant et inversement

Cette vitesse est fonction de la vitesse de rotation du rotor et d'autre part du nombre de paires de pôles au stator et au rotor. Pour une fréquence de 50Hz, on associe :

- Machine bipolaire (le nombre de pair de pôles  $p = 1$ ),  $N=50tr/s$  soit  $3000tr/mn$
- Machine quadripolaire ( $p = 2$ ), une rotation de  $25tr/s$  soit  $1500tr/mn$
- Machine Hexa-polaire à 6 pôles ( $p = 3$ ), une rotation de  $17tr/s$  soit  $1000tr/mn$
- Machine hecto-polaire ( $p = 4$ ), une fréquence de rotation de  $12.5tr/s$  soit  $750tr/mn$

#### 4.6.2- Constitution d'une machine synchrone

Une machine synchrone est une machine électrique tournante réversible. En fonctionnement moteur, elle est alimentée par une source de tension alternative le plus souvent triphasée pour entraîner une charge mécanique à une vitesse de rotation constante. En fonctionnement en générateur, elle est entraînée par un dispositif mécanique pour produire de l'énergie électrique alternative dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation. La machine synchrone. Trouve essentiellement ses applications dans la production de d'énergie électrique alternative dans les centrales hydro-électriques, thermiques et nucléaire sous la dénomination d'Alternateur. Cela dit, ceci n'empêche pas son utilisation en tant que moteur. Cette machine est organisée comme suit :

##### **Le Stator :**

C'est la partie fixe de la machine. Composée d'une culasse ferromagnétique, siège de la circulation du champ magnétique. Cette culasse est formée par un empilage de disques de tôles ferromagnétique collées les unes aux autres et isolées entre elles pour réduire au minimum les pertes par courants de Foucault. La culasse est munie d'encoches dans lesquelles sont logés les conducteurs de l'enroulement triphasé. Le stator est protégé par une carcasse généralement en fonte, sous forme d'ailette

pour agrandir la surface de contact avec l'air environnant afin de favoriser le refroidissement. Le stator est alimenté par une source électrique triphasée.

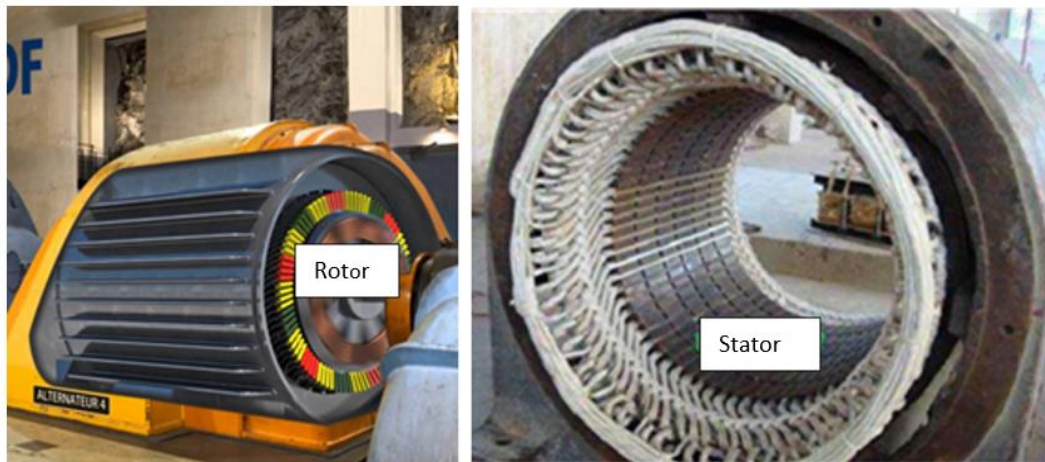


Figure 4.7 Stator composé d'une culasse encochée et une carcasse sous forme de ailettes d'un alternateur

### Le rotor :

Le rotor est la partie tournante de la machine, ayant pour rôle de créer le champ magnétique d'induction (inducteur). Il est appelé aussi roue polaire. Le rotor est composé d'un empilement de disques ferromagnétiques.

On distingue donc trois grandes familles de machine synchrone : Les rotors bobinés à pôles lisses, les rotors bobinés à pôles saillants et les rotors à aimant permanent.

Dans le cas de machines à rotor bobiné à pôles lisses, le rotor est un cylindre plein sans encoches apparentes pour s'adapter aux grandes vitesses. Il possède le plus souvent des enroulements logés dans des encoches pratiquées sur le rotor. L'alimentation en courant s'effectue via l'ensemble bagues-balais aux bagues de bout d'arbre.

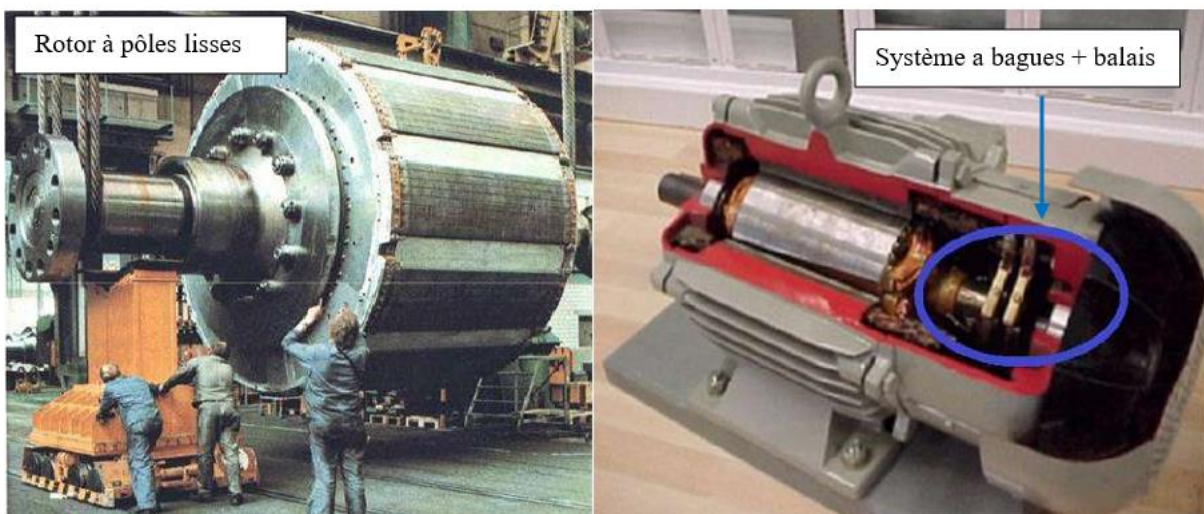


Figure 4.8 Rotor bobinés à pôles lisses et système a bagues sur lesquelles glissent les balais

## 4.7- Machines asynchrones

Les machines asynchrones sont les plus fréquemment utilisés dans l'industrie comme moteurs à cause de leur fiabilité, leur simplicité, leur robustesse et leur faible coût d'acquisition et de maintenance. Ils sont appelés ainsi pour le fait que leur vitesse de rotation est légèrement inférieure à la fréquence du réseau ou source d'alimentation, responsable de la production du champ magnétique tournant. Ce dernier entraîne le rotor qui n'a pas de connexion électrique en le faisant tourner au fur et à mesure que le champ magnétique continue de tourner.

Ces moteurs sont utilisés dans une large gamme d'applications vu de leur efficacité et fiabilité. En plus ils ont une conception simple et disponibles sur le marché, ce qui en fait l'un des premiers choix. On trouve leurs applications aussi biens abondantes que diversifiés, telles que les pompes, les compresseurs et les ventilateurs, et les presses en raison de leur rendement élevé.

Le moteur à induction est un type de moteur asynchrone, est considéré comme le moteur électrique le plus utilisé dans le monde. Il ne nécessite pas de balais ni de collecteurs, ce qui le place parmi les moteurs les moins entretenus, ayant des durées de vie plus longues que les moteurs autres types de moteurs tels que les moteurs à courant continu. Les moteurs asynchrones ont la possibilité de maintenir une vitesse constante sous des charges variables, en raison de leur champ magnétique de rotor qui dépendant du glissement.

### 4.7.1- Constitution

Un moteur asynchrone triphasé à cage comporte deux parties principales : un inducteur ou stator et un induit ou rotor.

#### A- Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse fabriquée en fonte ou en alliage, renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées les unes des autres par oxydation ou par un vernis isolant. Le feuilletage du circuit magnétique en tôles minces réduit les pertes par hystérésis et celles par courants de Foucault comme le montre la Figure 4.9 qui illustre différentes conceptions des stators des moteurs asynchrones.

Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas d'un Un

moteur asynchrone triphasé) Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation.



Figure 4.9 Différentes conceptions de Stators de moteurs asynchrones

## B- Le rotor

C'est la partie mobile du moteur. Comme le circuit magnétique du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre sur l'arbre du moteur. Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrones : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné, dit aussi à bagues.

### a- Le rotor à cage

L'enroulement du rotor à cage d'écureuil, est constitué de barres de cuivre nues insérées dans les encoches. A chaque extrémité des barres sont soudées deux anneaux qui les court-circuitent. Le rotor à cage dans l'ensemble ressemble (comme l'indique son nom) à une cage d'écureuil. Dans les moteurs de petite et moyenne puissance, les barres et les anneaux forment un seul bloc d'aluminium coulé comme le montre la figure 4.10. Il existe plusieurs types de rotor à cage, ils

sont tous conçus selon l'assemblage de la figure éclatée 4.11 qui illustre les différentes parties constituante une machine asynchrone a cage. Nous citerons ces différents types dans l'ordre du moins répandu au plus courant :

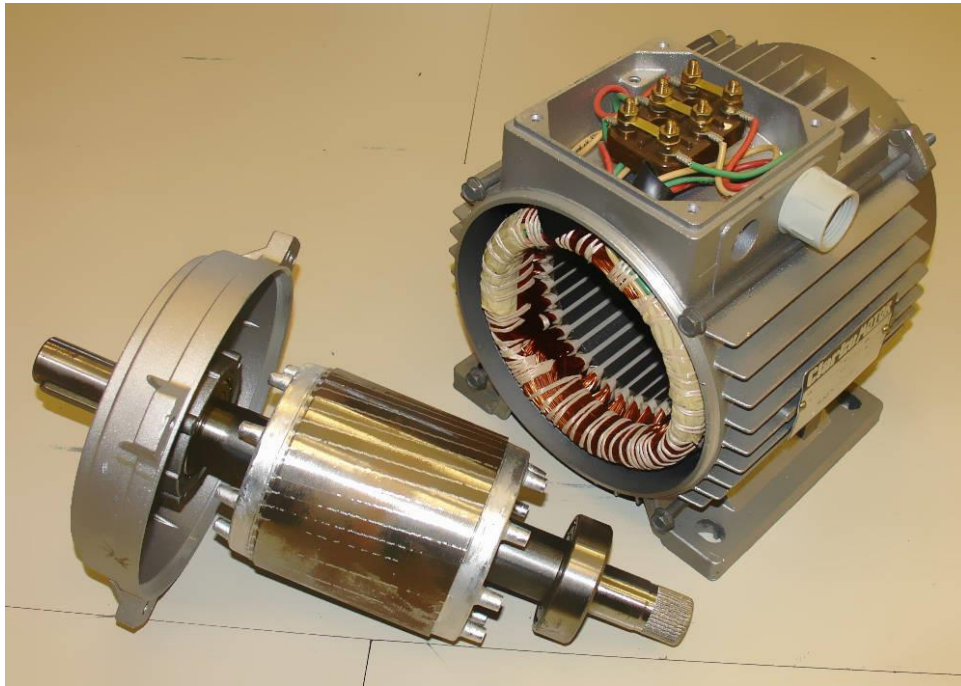


Figure 4.10 Les parties d'un moteur asynchrone : le rotor à gauche et le stator à droite

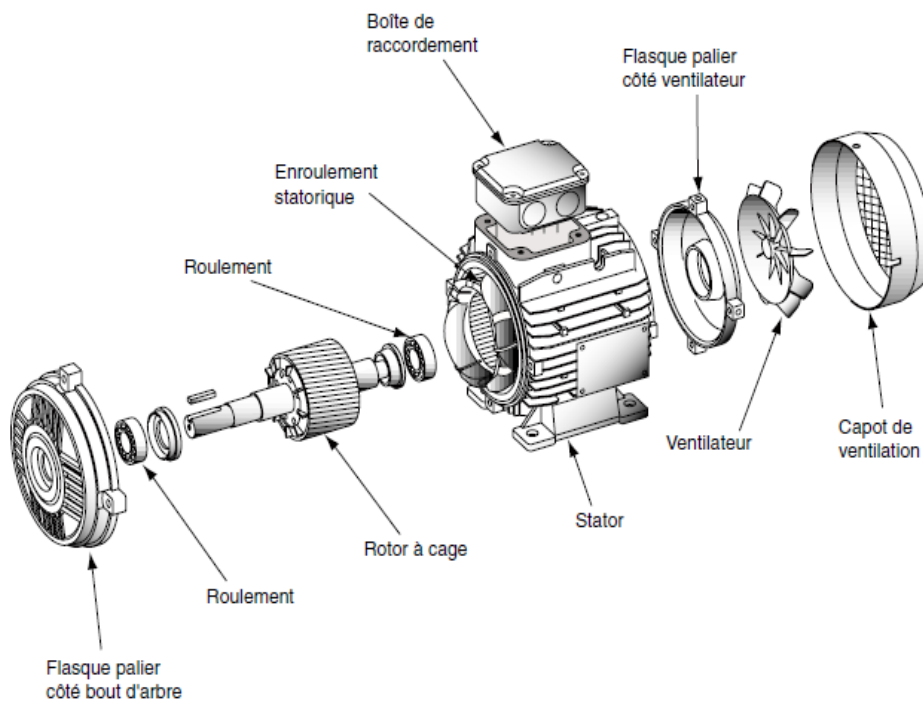
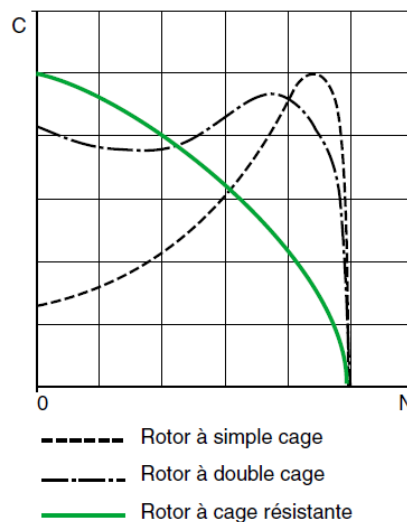


Figure 4.11 Eclatement d'un moteur à rotor à cage

### b- Rotor à cage résistante

Ce type de rotor existe en particulier en simple cage qui par définition est un moteur ou on trouve dans des encoches disposées sur la périphérie du rotor constitué par l'empilage de tôles) sont placés des barres conductrices reliées à chaque extrémité par une couronne sur lesquels vient s'exercer le couple électromagnétique généré par le champ. La cage est fermée par deux anneaux résistants (alliage particulier, section réduite, anneaux d'inoc ...). Ces moteurs présentent un fort glissement au couple nominal. Leur couple de démarrage est particulièrement élevé et le la vitesse du flux magnétique tournant dépend de la fréquence du réseau d'alimentation. Notons que la vitesse rotorique varie est fonction d'une part de la fréquence du réseau et d'autre part du nombre de paires de pôles au stator et au rotor. Pour une fréquence donnée (50Hz par exemple), on associe un faible courant de démarrage et en raison des pertes rotoriques, leur rendement est relativement faible (voir les courbes de la Figure 4.12).



**Figure 4.12 Courbes des couples en fonction de la vitesse selon le type du moteur à cage**

Ces moteurs ont pratiquement des applications diverses à savoir :

- Où la vitesse doit s'adapter en fonction du couple, par exemple : cas d'un groupe de moteurs liés mécaniquement sur lesquels doit être répartie la charge, tels que train à rouleaux d'un laminoir ou l'entraînement d'un portique de levage ;
- Dans l'enrouleur-dérouleur à partir de moteurs prévus à cet effet ;
- Là où on a besoin d'un puissant couple de démarrage avec un appel de courant limité (convoyeurs ou palans de levage).

Les moteurs asynchrones à simple cage permettent la variation de la vitesse par la simple de la tension, mais cette application tend à disparaître au profit des convertisseurs de fréquence [19].

### c- Rotor à simple cage

Dans les encoches disposées sur la périphérie du rotor sont placés des barres conductrices reliés aux deux extrémités par des couronnes métalliques et sur lesquels vient s'exercer le couple moteur généré par le champ tournant. Pour que le couple soit régulier, les conducteurs ne sont pas disposés perpendiculairement par rapport à l'axe de rotation du moteur et sont légèrement inclinés du moteur (voir la figure 4.13).

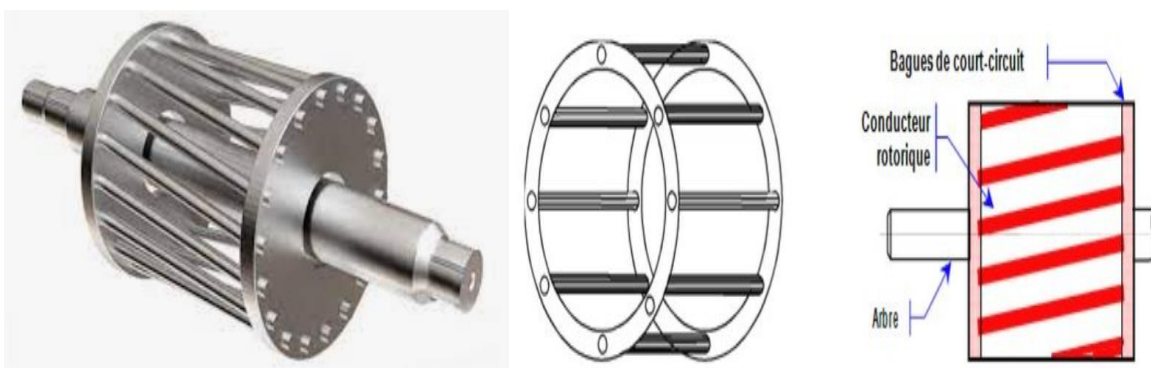


Figure 4.13 Rotor à cage

Le couple de démarrage de ces moteurs est relativement faible et l'appel de courant absorbé lors régime transitoire de démarrage dépasse largement le courant nominal (voir figure 4.13). En contrepartie, ils bénéficient d'un faible glissement lors du fonctionnement en couple nominal. Ces moteurs ont des applications sur des pompes et ventilateurs vu qu'ils sont utiles pour les fortes puissances pour améliorer le rendement des installations. Ils sont également accompagnés par des convertisseurs de fréquence en vitesse variable, afin de résoudre les problèmes de couple et de courant de démarrage.

### d- Rotor à double cage

Il comporte deux cages en forme concentriques, l'une intérieure, de forte section et de résistance assez faible, l'autre extérieure, de faible section et plus résistante. Au démarrage, les courants rotoriques sont à fréquence élevée ce qui résulte le fait que la totalité du courant rotorique circule à la périphérie du rotor traduisant ainsi le phénomène est appelé communément (l'effet de peau) et donc le courant circule dans une section réduite des conducteurs. Au début du démarrage, le courant rotorique étant de fréquence élevée, le courant



ne circule que dans la cage extérieure. Le couple produit par la cage extérieure résistante est important et l'appel de courant réduit (revoir la figure 4.12 ci-dessus présentée).

En fin de démarrage, la fréquence diminue, le passage du flux à travers la cage intérieure est plus fluide. Le comportement du moteur est alors comme s'il était construit avec une seule cage. En régime permanent ou établi, la vitesse est légèrement inférieure à celle du moteur à simple cage (voir la figure 4.14).

#### e- Rotor à encoches profondes

Comme c'est illustré sur la figure 4.14, les conducteurs rotoriques sont logés dans les encoches du rotor de forme trapézoïdale dont le petit côté est à l'extérieur du rotor. C'est la réalisation standardisée. Le fonctionnement est semblable au moteur à double cage. L'intensité du courant rotorique varie en fonction inverse de la fréquence. Ainsi, au début du démarrage, le couple est élevé et l'appel de courant réduit. En régime établi, la vitesse est sensiblement celle du moteur à simple cage.

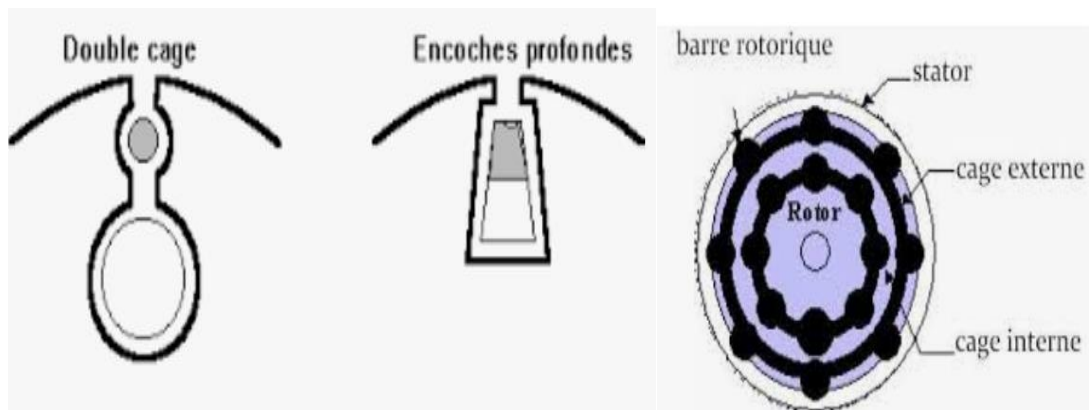


Figure 4.14 Configuration de la double et à cage profonde

#### f- Le rotor bobiné (rotor à bagues)

Les encoches sont conçues pratiquement à la périphérie du rotor où sont logés des enroulements du rotor, comme le montre clairement la figure 4.15. Généralement la configuration la plus fréquente est le rotor triphasé. Si l'extrémité de chacun des enroulements est raccordée à un point commun des trois enroulements ; on est sûr avec un couplage étoile. Les extrémités sont raccordées sur trois bagues en cuivre, isolées et solidaires du rotor. Sur ces bagues viennent frotter des balais à base de graphite, jouant ainsi le rôle d'intermédiaire électrique entre le moteur asynchrone et le réseau extérieur [14, 20].

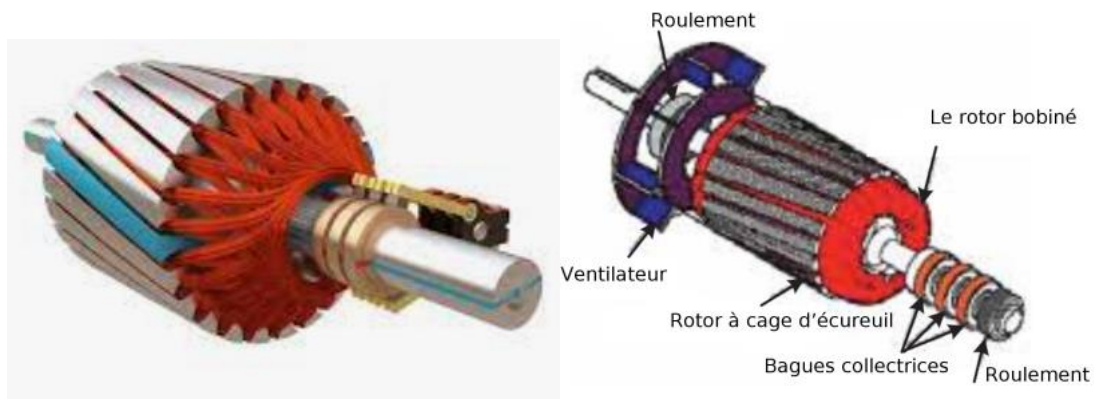


Figure 4.15 Rotor bobiné d'un moteur asynchrone avec balais frottant sur les bagues en cuivre

En fonction de la valeur de la résistance du cuivre du rotor, ce moteur peut développer un couple de démarrage pouvant atteindre 2,5 fois le couple nominal. Le courant au démarrage est fonction du couple développé sur l'arbre moteur. Cette solution est peu avantageuse comparée aux moteurs sans balais, elle est de plus en plus abandonnée au profit des moteurs à cage. En effet ces derniers, mise à part la réduction significative des pertes par effet joule qui contribuent considérablement à l'échauffement de la machine, elles permettent de résoudre les problèmes de maintenance des balais qui doivent être systématiquement remplacés et les problèmes de commutation se traduisant par les étincelles plus ou moins fortes au contact balais-bagues qui peuvent provoquer des incendies, notamment en présence d'une atmosphère inflammable.

#### 4.7.2- Variation de la vitesse des moteurs asynchrones

##### A- Quadrants de fonctionnement

Toutes machine électrique tournante est naturellement réversible. Pour en bénéficier, le convertisseur et la source doivent être également réversibles. On ne peut pas récupérer l'énergie de la génératrice si la source n'est pas réversible lors d'une phase de freinage de la machine. Le choix de la structure du duo convertisseur/machine à 1, 2 ou 4 quadrants repose exclusivement sur le cahier des charges [21-23]. Le schéma 4.16 montre les 4 quadrants de fonctionnement.

- **Quadrant I seul** : la machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou nul (accélérations contrôlées et décélération non contrôlées)
- **2 Quadrants (I et II)** : la machine ne tourne que dans un seul sens de rotation, le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlées)

• **2 Quadrants (I et IV)** : la machine tourne dans les deux sens de rotation (pour le sens inverse la charge est nécessairement entraînée), le couple est toujours positif. (Accélérations contrôlées et décélération non contrôlées)

• **4 Quadrants (I à IV)** : la machine tourne dans les deux sens de rotation quelque soit à charge entraînée, le couple est positif ou négatif (accélérations et décélération contrôlées)

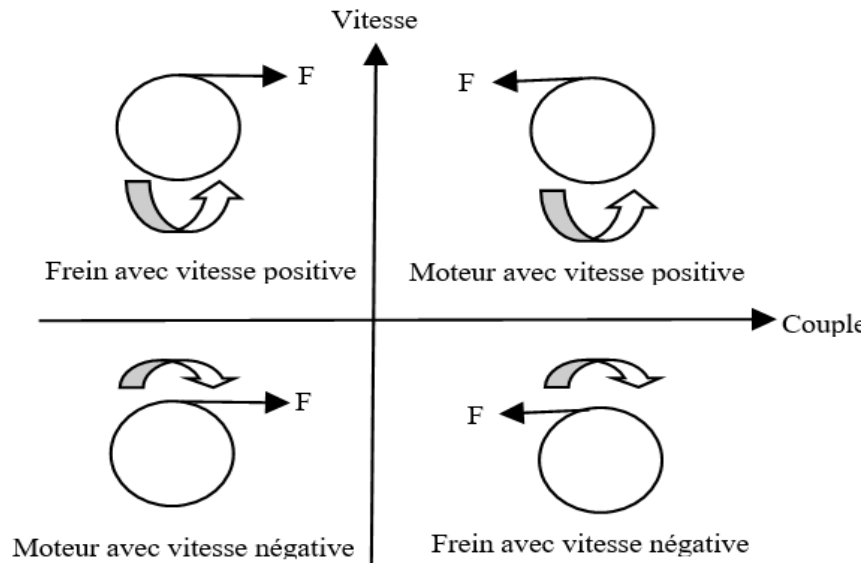


Figure 4.16- Quadrants de fonctionnement

### B- Schéma équivalent et expression du couple

Le schéma équivalent est un concept simplifié des circuits électromagnétiques existants dans la machine asynchrone. Le schéma équivalent en régime sinusoïdal équilibré monophasé le plus utilisé est celui dit en (T) est comme le montre la figure 4.17 est le suivant :

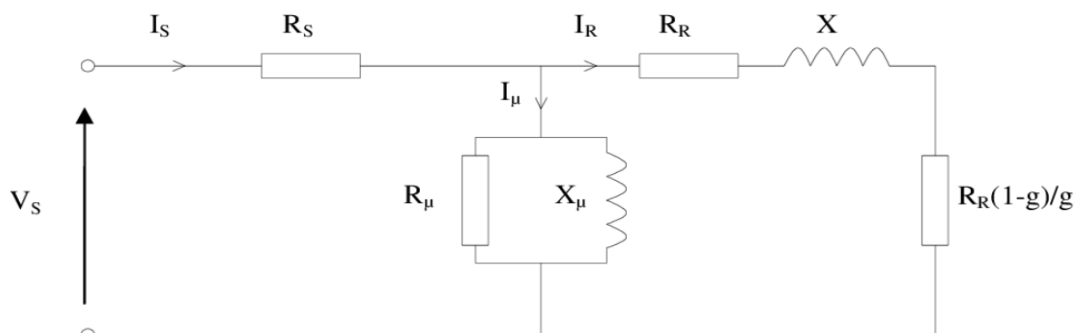


Figure 4.17 Schéma équivalent en (T) d'un moteur asynchrone monophasé

Ici  $R_S$  est la résistance du circuit statorique ;

$R_R$  : est la résistance du circuit rotorique ;

$X$  est la réactance rotorique ;

$R_R(1-g)/g$  représente la charge ;

$R_\mu$  et  $X_\mu$  représente successivement la résistance et la réactance du circuit magnétique.

C'est à partir de ce schéma que nous pouvons donner l'expression du couple électromagnétique produit par la machine. Exprimons tout d'abord la puissance transmise au rotor :

$$P_{em} = m_1 \cdot \frac{R_R}{g} \cdot I_R^2 = C_{em} \cdot \omega_s$$

Qui après avoir remplacé le courant par sa valeur peut s'écrire :

$$C_{em} = \frac{m_1 \cdot p \cdot V_1^2 \cdot \frac{R_R}{g}}{2\pi f \cdot \left[ \left( R_s + \frac{R_R}{g} \right)^2 + (X_s + X_R)^2 \right]}$$

Ici  $f$  est la fréquence du réseau ;

$P_{em}$  est la puissance électromagnétique ;

$C_{em}$  est le couple électromagnétique ;

Le glissement est exprimé par la lettre ( $g$ ) ;

Le nombre de phases pour le circuit statorique est exprimé par  $m_1$  et analogiquement pour le circuit rotorique.

$V_1$  est la tension d'alimentation du moteur

### C- Variation de vitesse de la machine asynchrone

Le point de fonctionnement ( $C, \omega$ ) dans le quadrant I en régime établi de l'ensemble machine et la charge, se situe à l'intersection des caractéristiques  $C = f(\omega)$  du moteur et de la charge (voir figure 4.18). Le réglage de la vitesse de la machine asynchrone est donc obtenu en agissant sur le couple qu'elle produit. Pour le faire, on agit soit par le changement du nombre de paires de pôles, la tension d'alimentation de la machine, le glissement ou la fréquence d'alimentation de la machine ainsi que par le changement des paramètres conceptuels du rotor qui sont la résistance et réactance rotoriques.

Les deux expressions du couple et de la vitesse nous donne une idée claire sur les différentes possibilités de variation de la vitesse du moteur asynchrone qui peuvent se résumer de la manière suivante.

Du côté stator : on peut varier la vitesse du moteur par la variation de la tension d'alimentation  $V_I$  ou par sa fréquence  $f$  et par la variation du nombre de paires de pôles  $p$ .

Du côté rotor : on peut le faire soit par la variation de la résistance rotorique soit par la variation de sa réactance.

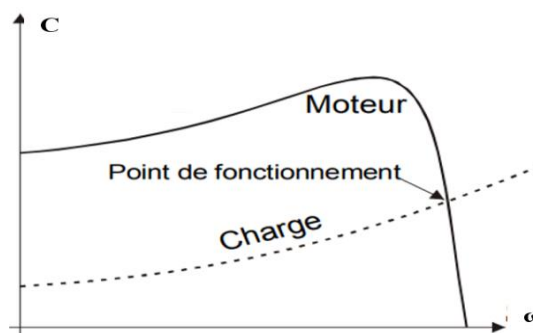


Figure 4.18 Caractéristique du couple en fonction de la vitesse  $C = f(\omega)$

**Réglage par variation du nombre de paires de pôles :** Cette variation n'est pas continue de la vitesse. Ce mode n'est donc pas envisageable pour un réglage du point de fonctionnement désiré. La conception de la machine est faite avec l'attribution de nombre de paires de pôles prédéterminé selon le cahier des charges.

**Réglage par variation de tension :** Le couple électromagnétique de la machine asynchrone est proportionnel au carré de la tension d'alimentation. Il est donc possible d'envisager une variation de la vitesse en dessous de la vitesse nominale en changeant la tension d'alimentation statorique avec un gradateur triphasé. C'est la solution la plus souvent utilisée pour le démarrage.

**Réglage par variation du glissement :** L'utilisation des résistances rotorique permet un réglage de la vitesse en dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la cascade hypo-synchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné [24-26].

**Réglage par variation de fréquence :** La fréquence de rotation de la machine est près proportionnelle au glissement et à la fréquence d'alimentation statoriques. Une fréquence variable du réseau d'alimentation générée par les onduleurs de tension entraîne une variation

de la vitesse. On peut aussi injecter des courants dans les enroulements pour imposer un certain couple à la machine par les onduleurs de courant ou commutateurs de courant. On peut également convertir directement la fréquence du réseau industriel en une fréquence variable plus faible (de 0 au un tiers de la fréquence réseau) à l'aide d'un cyclo-convertisseur à commutation naturelle piloté lui aussi en fréquence en courant ou vectoriellement. Actuellement l'électronique de puissance a tellement évolué pour nous offrir des possibilités et combinaisons innombrables dans le domaine de l'entraînement et du contrôle des machines électriques [27-29].

#### **4.8- Exercices corrigés sur les machines à courant alternatif**

##### **Exercice N°1:**

Un alternateur triphasé est couplé en étoile. Sur une charge résistive, il débite un courant de 20 A sous une tension de 220 V entre deux bornes de l'induit. La résistance de l'inducteur est de 50  $\Omega$ , celle d'un enroulement de l'induit de 1  $\Omega$ . Le courant d'excitation est de 2 A. Les pertes collectives sont évaluées à 400 W.

Calculer :

- 1-la puissance utile ;
- 2-la puissance absorbée par l'inducteur ;
- 3-les pertes Joule dans l'induit ;
- 4-le rendement

##### **Exercice N°2 :**

Un alternateur triphasé couplé en étoile fournit un courant de 200 A sous une tension entre phases  $U = 400$  V à 50 Hz, avec un facteur de puissance de 0,866 (charge inductive).

- 1-Calculer la puissance utile de l'alternateur.
- 2-La résistance mesurée entre phase et neutre du stator est 30 m $\Omega$ . Calculer les pertes Joule au stator.
- 3-L'ensemble des pertes collectives et par effet Joule au rotor s'élève à 6 kW. Calculer le rendement de l'alternateur.

##### **Exercice N°3 :**

Un générateur synchrone triphasé 1250 KVA, 10 pôles et 60 Hz, connecté en étoile à une charge de 4160 V (avec un facteur de puissance arrière de 0,8) possède une résistance d'armature de

0,126  $\Omega$  par phase et une réactance par phase de 3  $\Omega$ . Déterminer la f.e.m E sous charge délivrée par le générateur.

**Solution de l'exercice N°1:**

1-la puissance utile :  $\sqrt{3} \times UI \times \cos\phi = \sqrt{3} \times 220 \times 20 \times 1 = 7,62 \text{ kW}$

2-la puissance absorbée par l'inducteur : C'est les pertes Joule à l'inducteur :  $50 \times 2^2 = 200 \text{ W}$

3-les pertes Joule dans l'induit :  $3 \times 1 \times 20^2 = 1200 \text{ W}$  (couplage étoile)

4-le rendement : Puissance absorbée par l'alternateur = puissance utile + pertes totales  
 $= 7,62 + (0,2 + 1,2 + 0,4) = 9,42 \text{ kW}$

Rendement =  $7,62 / 9,42 = 81 \%$

**Solution de l'exercice N°2:**

1-Calculer la puissance utile de l'alternateur.

$$P_u = \sqrt{3} UI \cos \phi = \sqrt{3} \times 400 \times 200 \times 0,866 = 120 \text{ kW}$$

2-La résistance mesurée entre phase et neutre du stator est 30 m $\Omega$ . Calculer les pertes Joule au stator.

$$P_{js} = 3RSI^2 = 3 \times 0,03 \times 200^2 = 3,6 \text{ kW}$$

3-L'ensemble des pertes collectives et par effet Joule au rotor s'élève à 6 kW. Calculer le rendement de l'alternateur.  $\eta = 120 / (120 + 3,6 + 6) = 92,6\%$

**Solution de l'exercice N°3:**

- Déterminer la f.e.m E sous charge délivrée par le générateur.

Nous avons :  $I = 1250 \cdot 103 / (\sqrt{3} \cdot 4160) = 173,48 \text{ A}$ .

En la mettant sous la forme polaire :

$$I = 173,48 \angle -36,87^\circ \text{ A}$$

Aussi,  $Z = 0,123 + 3j = 3,0026 \angle 87,595^\circ \Omega$ .

Nous pouvons donc déduire E ;  $E = ZI + U$

$$E = (4160/\sqrt{3}) + (173,48 \angle -36,87^\circ) (3,0026 \angle 87,595^\circ) = 2761,137 \angle 8,397^\circ$$

**Bibliographie**

- [1] Ducharne Benjamin. “Caractérisation et modélisation de circuits magnétiques : du global vers le local”, Université Claude Bernard-Lyon, 2003.
- [2] Philippe Robert. “Matériaux de l'électrotechnique”, Traité d'électricité, Presse Polytechniques Romandes, Troisième édition, 1989.
- [3] A. P. Malozemoff and J. Slonczewski, Magnetic domain walls in bubble materials (Academic Press, New York, 1979).
- [4] P. Weiss, J. Phys. Théor. Appl. 6(1), 661 (1907).
- [5] Assistant responsable Oscar Cubero (217) 1 novembre 2006, [http://www.unine.ch/files/live/sites/physique/files/TP/Expériences/Exp31\\_Hysteresis.pdf](http://www.unine.ch/files/live/sites/physique/files/TP/Expériences/Exp31_Hysteresis.pdf)
- [6] <http://www.surprises.ch/HT/annexes/pertes.pdf>
- [7] Marc Séguin, Physique XXI Tome B Page 8 Note de cours rédigée par Simon Vézina
- [8] <https://www.techno-science.net/definition/6769.html>
- [9] [http://fabrice.sincere.pagesperso-orange.fr/cm\\_electricite/magnetisme20s/annexe](http://fabrice.sincere.pagesperso-orange.fr/cm_electricite/magnetisme20s/annexe)
- [10] [https://public.iutenligne.net/electricite/piou/motoelecpro/1.cours\\_TD\\_mcc\\_light.pdf](https://public.iutenligne.net/electricite/piou/motoelecpro/1.cours_TD_mcc_light.pdf)
- [11] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_%C3%A0\\_courant\\_continu](https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_%C3%A0_courant_continu)
- [12] <https://www.elharzli.com/structureMCC.php>
- [13] [http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/application\\_builder5/education.htm#torque](http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/application_builder5/education.htm#torque)
- [14] M. Kostenko et L. Piotrovski, ”Machines Electriques : Machines à Courant Alternatif” Tome II, 3ème édition, Édition MIR, 1979.
- [15] Wildi, T. (2014). Electrical machines, drives, and power systems (Sixth edition. International edition). Pearson Education.
- [16] A. Ivanov-Smolensky, ”Electrical Machines”, Édition MIR, 1982.
- [17] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance)
- [18] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance)
- [19] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_%C3%A9lectrique#Les\\_diff%C3%A9rents\\_types\\_de\\_transformateurs](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_%C3%A9lectrique#Les_diff%C3%A9rents_types_de_transformateurs)
- [20] E. Gaucheron, 2004, les moteurs électriques pour mieux les piloter et les protéger, Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n°207, <http://www.schneider-electric.com>
- [21] Abdelfettah KERBOUA, 2014, MACHINES ELECTRIQUES A COURANT ALTERNATIF, UNIVERSITE DE MASCARA, Faculté des Sciences et de la Technologie
- [22] [file:///C:/Users/admin/Downloads/varmas%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/varmas%20(2).pdf)
- [23] Cours d'Electricité 2 — Électrotechnique ”L'alternateur synchrone”, I.U.T Mesures Physiques, Université Montpellier 2, Année universitaire 2008-2009.
- [24] G. R. Slemon, ”Electrical machine and drives”, Addison-Wesley publishing company, 1992.
- [25] A. Fouillé, ”Electrotechnique à l'usage des ingénieurs : Machines électriques” , Tome II, Édition Dunod, 1957.
- [26] G. Séguier, F. Notelet, ”Electrotechnique industrielle”, Téch et Doc, 1987.
- [27] J.L. Dalmaso, ”Cours d'électrotechnique 1 : Machines tournantes à courants alternatifs”, Éditions Belin, 1985.



- 
- [28] Abdelkrim Rechach. " Modélisation et contrôle intelligent du moteur à réluctance variable en vue de son utilisation en énergie propre ", These de doctorat en sciences, Institut des mines, université Echahid Cheikh Larbi Tébessi Tebessa Algeria. [https://www.researchgate.net/publication/362016820\\_Modelisation\\_et\\_controle\\_intelligent\\_du\\_moteur\\_a\\_reluctance\\_variable\\_en\\_vue\\_de\\_son\\_utilisation\\_en\\_energie\\_propre](https://www.researchgate.net/publication/362016820_Modelisation_et_controle_intelligent_du_moteur_a_reluctance_variable_en_vue_de_son_utilisation_en_energie_propre)
- [29] Abdelkrim Rechach, Sihem Ghodelbourk, Zoubir Aoulmi, Dib Djalel. "Smart Controls for Switched Reluctance Motor 8/6 Used for Electric Vehicles Underground Mining Security", *European Journal of Electrical Engineering* Vol. 23, No. 6, December 2021, pp. 423-432. <https://doi.org/10.18280/ejee.230601>.
- [30] Sihem Ghodelbourk, Ahmad Taher Azar, Djalel Dib, and Abdelkrim Rechach. "Fractional order control of switched reluctance motor", *International Journal of Advanced Intelligence Paradigms* Vol. 21, No. 3-4 Published Online: 7 Apr 2022.