

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie  
Département Génie Mécanique

## Mémoire de Master

**Filière :** Electromécanique

**Spécialité :** Electromécanique

### THEME

**Contribution à l'Elaboration d'une Nouvelle Commande de deux Moteurs  
Asynchrones du Four Rotatif de la Société SCMI**

**Présenté par :**

MAGRAMANE Hamza

AIT TAHAR Mohamed Adem

**Promoteur\_:**

Mme BAHLOUL H.

**Encadreur:**

Mr LAHCINE Elhadi

**Promotion 2020- 2021**

## ملخص

تم إعداد هذه الرسالة كجزء من السنة الأخيرة لنيل درجة الماجستير في الكهروميكانيكي. تم التدريب داخل شركة الأسمنت متيجة. وسنحل مشكلة في محركي الفرن لمصنع الأسمنت في مفتاح.

الهدف من هذا المشروع هو تغيير محركان متزامنان ذات التيار المستمر بمحركين غير متزامنان ذات تيار متردد، لعدة أسباب بما في ذلك تقليل صيانة المحركات، وتقادم قطع الغيار الكهربائية لمحرك ذات تيار مستمر، وإمكانية زيادة التدفق. لهذا قمنا بدراسة التحسين لهذا الأخير.

**الكلمات المفتاحية:** محرك غير متزامن، مغير السرعة، الفرن الدوار

## Résumé

Ce présent mémoire a été élaboré dans le cadre de la dernière année du cursus du Master en électromécanique. Le stage s'est déroulé au sein de la Société des Ciments de la Mitidja (SCMI) où nous allons résoudre un problème persistant dans les deux moteurs d'un four de la cimenterie de Meftah.

Le but de ce projet est de changer les deux commandes synchrones (à courant continu) Maître/esclave par deux commandes asynchrones courant alternatif Maître/esclave, et cela pour plusieurs raisons parmi lesquelles la diminution de la maintenance apportée aux moteurs, l'obsolescence de la pièce de rechange électrique à courant continu, et la possibilité d'augmentation du débit. Pour tout cela, une étude d'optimisation de ce dernier est indispensable.

**Mots clés :** Machine Asynchrone, variateur de vitesse, four rotatif.

## Abstract

This thesis was prepared as part of the last year of the Master's degree in Electromechanics. The internship took place within the Company of Cements of Mitidja (SCMI) and we will solve a problem on the two furnace engines of the Cement plant of Meftah.

The goal of this project is to change the two synchronous (direct current) master/slave controls by two asynchronous alternating current controls Master/slave, for several reasons including reducing the maintenance of the motors, Obsolescence of the electric spare part has direct current, and Possibility of increasing in flow. For this we did an optimization study of the latter.

**Keys words:** asynchronous Machine, speed variator, rotary kiln.

## ***Remerciements***

Je tiens à remercier, en premier lieu le BON DIEU de m'avoir donnée le courage et la patience pour faire ce travail

Je remercie aussi ma promotrice, madame **BAHLOUL .H** Pour toute l'aide qu'elle m'a apportée durant toute la durée de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à mon Co-Promoteur **monsieur LAHCINE ELHADI** pour sa disponibilité et l'intérêt constant qu'elle n'a cessé de m'apporter pour l'élaboration de ce mémoire.

Tous nos remerciements à l'ensemble du personnel du champ de SCMI surtout **Turkia Toufik** et **Kheider Hamid** pour leurs collaborations et leur accueil chaleur, et tout le groupe du département méthodes.

Mes remerciements vont également aux membres de jury et au président qui me fera l'honneur d'examiner mon travail.

Que toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont collaboré à l'élaboration de ce mémoire, trouvent ici nos sincères reconnaissances.

## ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents qui ont tant donné pour me voir réussir*

*A mes chers frères en particulier Abdelkader*

*A Ma sœur*

*A mes chers grands parents*

*A mes chers oncles*

*A mes chères tantes en particulier djamila*

*A tous mes amis en particulier Hamza, aboubaker, Mohamed, et Oussama*

*A mon binôme adem, et à tous ceux qui me sont chers*

*Toute la promotion Electromécaniques <<2021>>*

*Je dédie enfin ce travail à toute personne ayant contribué de près ou de loin à sa concrétisation.*

*Hamza.M*

## *Dédicace*

*Je remercie avant tout dieu le tout puissant qui m'a donnée la vie, un esprit sain et le pouvoir et la volonté d'accomplir ce travail*

*Je dédie ce modeste travail à ma très cher Maman qui a su être à mes côtés dans les moments difficile sans elle je n'aurai jamais abouti à ce stade d'étude ; ainsi que chaque instant de bonheur qu'elle m'a procuré, fasse dieux que je puisse l'honorée*

*A mon père Allah yerahmo*

*A mes sœurs qui me sont soutenu depuis tous le temps je les aime*

*A ma Femme parce qu'elle a su me donner les forces dans les moments de doute, pour son soutien et son écoute*

*A mon binôme hamza, et à tous ceux qui me sont chers*

*Toute la promotion Electromécaniques <<2021>>*

*Et je vous dis merci pour les personnes qui m'ont aidée de loin ou de près pour la réalisation de ce mémoire.*

*Adem.A*

## Liste des figures chapitre I

Figure (I .1) : La vue du SCMI	3
Figure (I .2) : Réalisations de Ciment.	5
Figure (I .3) : Les matières premières du ciment	7
Figure (I .4) : Schéma du processus de fabrication du ciment.	7
Figure (I .5) : Carrière calcaire	8
Figure (I .6) : Extraction de la matière première.	9
Figure (I .7) : Déchargement du calcaire dans le concasseur.	9
Figure (I .8) : Concassage et transport.	10
Figure (I .9) : Cuisson	12
Figure (I .10) : Four rotatif	13
Figure (I .11) : Broyage ciment.	14
Figure (I .12) : Expédition en sac ou vrac.	15
Figure (I .13) : Expédition en vrac.	15
Figure (I .14) : Expédition en sac.	15

## Liste des figures CHAPITRE II

Figure(II.1) : rotor à pôles saillants	18
Figure (II.2) : Structure d'une machine à 2 paires de pôles	19
Figure (II.3) : Rotor à pôles lisses	20
Figure (II.4) : Rotor d'une machine synchrone à pôles saillants	21
Figure (II.5) : Rotor à pôles lisses et rotor à pôles saillants	21
Figure (II.6) : Constitution d'un moteur asynchrone	22
Figure (II.7) : Stator Avec bobinage	23
Figure (II.8) : Stator sans bobinage	23
Figure (II.9) : Rotor à simple cage	24
Figure (II.10) : Cage d'écureuil	24
Figure (II.11) : Rotor à double cage	25
Figure (II.12) : Rotor à bagues	25
Figure (II.13) : Modèle d'une machine asynchrone triphasée	27
Figure (II.14) : Caractéristique mécanique.	31
Figure (II.15) : les trois domaines de fonctionnement de la machine	32
Figure (II.16) : Courbe du couple en fonction de la vitesse pour moteurs de classe B, C et D.L Coupe du rotor indique le genre de conducteurs utilisés.	34
Figure (II.17) : Quadrants de fonctionnements	38
Figure(II.18) : schéma de couplage étoile	38
Figure(II.19) : schéma de couplage triangle	39
Figure (II.20) : Bilan des puissances et des pertes	40
Figure (II.21) : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé	41

## Liste des figures CHAPITRE III

Figure(III.1) : Four rotatif	44
Figure(III.2) : A l'intérieur du four à clinker	45
Figure(III.3) : Emplacement d'un brûleur dans un four de cimenterie	47
Figure(III.4) : Commande directe des fours (polysuis)	48
Figure(III.5) : Le four rotatif des cimenteries	49

Figure(III.6) : Angle de talus	49
Figure(III.7) : Tronçon virole	50
Figure(III.8) : les bandages	50
Figure(III.9) : Puissance pour un four en fonction du diamètre	53
Figure(III.10) : Automate programmable industriel (API) S7-400	54
Figure(III.11) : Etapes de création du système de supervision Win CC	57
Figure(III.12) : Archivage des valeurs d'analyse utilisant Tag Logging	58
Figure(III.13) : Création des vues en utilisant Graphics Designer	59
Figure(III.14) : Puissance en fonction de la vitesse four	60
Figure(III.15) : Exemple de la courbe de la puissance four en marche normale	60
Figure(III.16) : Un exemple de la courbe de la puissance dans le cas d'une perturbation extrême de la charge	61
Figure(III.17) : Exemple de les courbes de la puissance four et les courants et les tensions	61
Figure(III.18) : La puissance de four in fonction de vitesse de rotation Liste des figures	62

### Liste des figures CHAPITRE IV

Figure (IV -1) : Schéma unifilaire	68
Figure (IV -2) : Moteur synchrone et refroidisseur	69
Figure (IV -3) : les deux variateurs de vitesse (Maitre/Esclave).	70
Figure (IV -4) : caractéristiques du transformateur.	71
Figure (IV -5): Chaîne de transmission.	71
Figure (IV -6): Schéma équivalent du moteur asynchrone.	72
Figure (IV -7): Schéma équivalent à une phase du moteur rotor ouvert.	73
Figure (IV -8): Schéma équivalent à une phase du moteur rotor fermé.	74
Figure (IV -9): Couple de démarrage du moteur asynchrone en fonction de sa vitesse.	74
Figure (IV -10): Caractéristiques du moteur asynchrone en fonction de la puissance utile.	76
Figure (IV -11): Point d'intersection du couple utile du moteur et le couple résistant de la charge en fonction de la vitesse.	77
Figure (IV -12): Rendement du moteur asynchrone en fonction de la puissance utile.	78
Figure (IV -13): Caractéristique mécanique d'une MAS pour plusieurs fréquences d'alimentation.	82
Figure (IV -14): Variateur de vitesse simplifié.	82
Figure (IV -15): courbe graphique de fonctionnement de variateur.	83
Figure (IV -16): Schéma de câblage de base.	84
Figure (IV -17): Constitution d'un câble BT.	89
Figure (IV -18): Organigramme de la méthode.	90
Figure (IV -19): Plaque signalétique de moteur asynchrone.	95
Figure (IV -20): valeur nominale, types et tensions (variateurs régénératifs en armoire ACS880-17).	96
Figure (IV -21) : Plaque signalétique transformateur.	97
Figure (IV -22) Schéma unifilaire dans nouvelle installations	98

## Liste des tableaux

### CHAPITRE IV

Tableau (IV-1) : Détermination des sections de conducteurs.	65
Tableau (IV -2): Caractéristiques du moteur asynchrone.	77

<b>Symbole</b>	<b>définition</b>
MAS	Moteur asynchrone.
API	Automate programmable industriel.
PCS	Procès control system (système de contrôle de procédés).
TIA	Totally Integrated Automation.
Win CC	Windows control central.
HMI	humain machine interface.
SCMI	Société des Ciments de la Mitidja.
S.P.A	Société Par Actions.
CEI	des normes nationales ou internationales.
DC	courant continu (Direct Curent).
AC	courant alternatif (alternatif Curent).
BT	Basse Tension.

<b>Symbole</b>	<b>Indice</b>
$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$	Les tensions appliquées aux trois phases statoriques.
$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$	Les tensions appliquées aux trois phases rotoriques.
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	Les courants qui traversent les trois phases statoriques.
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$	Les courants qui traversent les trois phases rotorique.
$\varnothing_{sa}, \varnothing_{sb}, \varnothing_{sc}$	Les flux totaux à travers ces enroulements.
$R_s$	Résistance d'une phase statorique.
$R_r$	Résistance d'une phase rotorique.
$[L_{ss}]$	Matrice des inductances statoriques.
$[L_{rr}]$	Matrice des inductances rotoriques.
$[M_{sr}]$	Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$	Matrice des inductances mutuelles rotoriques.
$L_s$	Inductance propre d'une phase statorique.
$L_r$	Inductance propre d'une phase rotorique.
$M_s$	Inductance mutuelle entre phases statoriques.
$M_r$	Inductance mutuelle entre phases rotorique.
$\theta_r$	Angle qui définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases Statoriques et rotoriques.
$m$	Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique lorsque les deux axes se coïncident.
$J$	Moment d'inertie des masses tournantes.
$C_r$	Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.
$C_e$	Couple électromagnétique.
$f$	Coefficient de frottement visqueux.
$\Omega_r$	vitesse mécanique en rad/s.
$C_u$	Couple utile [N.m].
$C_e$	Couple électromagnétique [N.m].
$P_{js}$	Pertes joule statorique [W].
$p_e$	Puissance transmise au rotor [W].
$P_M$	Perte mécanique.
$g$	Glissement.
$N_s$	la fréquence de rotation du champ statorique dans la machine.
$N_r$	la fréquence de rotation de la machine.

$W_s$	la vitesse angulaire de synchronisme du champ statorique dans la machine.
$W_r$	la vitesse angulaire de rotation de la machine.
$P_u$	puissance fournie par le moteur asynchrone triphasé.
$P_a$	puissance absorbée par le moteur asynchrone triphasé.
$\eta$	Rendement d'un moteur asynchrone.
$P_{js}$	Pertes Joule stator.
$P_{jr}$	Pertes : - Joule rotor.
$P_m$	Puissance mécanique.
$\theta$	$\frac{1}{2}$ angle de talus de matière.
$n$	(tr/min) vitesse de rotation.
$c$	coefficient dont la valeur est fonction de l'angle de talus naturel.
$Q_f$	Poids du four rotatif pour chaque appui.
$D_b$	diamètre du bandage.
$D_g$	diamètre du galet.
$D_p$	diamètre du palier.
$f$	coefficient de frottement dont la valeur dépend du type de palier.
$I_b$	Courant d'emploi en ampère.
$\rho$	Résistivité du conducteur en service normal.
$L$	longueur du câble en m.
$S$	section des conducteurs en $\text{mm}^2$ .
$\lambda$	Réactance linéique des conducteurs.
$K$	Coefficient de conditions.
$\Delta\theta_{cc}$	Echauffement dû au court-circuit ( $^{\circ}\text{C}$ ).
$\rho_{20}$	Résistivité du conducteur.
$I_{th}$	est le courant de court-circuit de courte durée.
$t_k$	Durée du court-circuit de courte durée.
$C$	Chaleur spécifique du métal.
$\delta$	Masse volumique du métal.

## Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------	---

### **Chapitre I : présentation de la cimenter de maftah**

I. Introduction	3
II. présentation générale	3
II-1. Présentation	3
II-1-1. Assiette de l'Usine	4
II-1-2. Historique	4
II-1-3. Organisation du Travail	5
II-1-4. Infrastructures	5
III. Etude descriptive de la chaîne de fabrication	6
III-1. Définition	6
III-1-1. Les composants du ciment	6
III-2. Le processus de fabrication du ciment	7
III-2-1. Zone I : Carrière calcaire	8
III-2-2. Zone II : Cru	10
III-2-3. Zone III : Cuisson	12
III-2-4. Zone IV : Ciment	13
III-2-5. Zone V : Expédition	14
IV- Conclusion	16

### **Chapitre II : Généralités sur les moteurs électriques**

II -1-Introduction	17
II-2-les machines synchrones	17
II- 2.1-définition	17
II-2-2-principe de fonctionnement	18
II-2.2 descriptions	18
II-3- généralités sur les moteurs asynchrones	22
II-3-1--définition	22
II-3-2-Constitution	22
II-3-3- Modélisation de la machine asynchrone	26
II-3-3-1- Hypothèses simplificatrices	26
II-3-3-2- Équation électrique	27
II-3-3-3-Equation magnétique	28
II-3-3-4-Equation mécanique	30
II-3-4-Caractéristique mécanique couple / vitesse	31
II-3-5- Couple du moteur asynchrone	32
II-3-6-classification des moteurs asynchrones	33
II-3-7- Bobinage	35
II-3-8- Principe de fonctionnement	35
II-3-9- Définition du glissement	36
II-3-10- Quadrants de Fonctionnements	37
II-3-11- Connexion au réseau	38

II-3-12- Bilans des puissances	39
II-3-13- Rendement d'un moteur asynchrone triphasé	41
II-3-14- Plaque signalétique	41
II-3-15-Avantages et inconvénients des machines électriques	42
II-3-16-Domaine d'application	43
II-4-Conclusion	43

### **Chapitre III : Généralités sur les fours rotatifs**

III-1-Introduction	44
III-2-Présentation des fours rotatifs de cimenterie	44
III-2-1-Les charges mécaniques mises en œuvre ou appliquées	45
III-2-2-On peut citer comme défauts de géométrie	46
III-2-3-Les sollicitations dues à la charge thermique	46
III-2-Le brûleur	46
III-3-Mécanique four	47
III-3-1-Généralités	47
III-3-2-Entrainement direct	49
III-3-3-Calcul de la puissance	51
III-3-4-Maintenance	53
III-4- système d'archivage	54
III-4-1-Matériel de l'automatisme utilisé	54
III-4-2-Définition de PCS7	56
III-4-3-Système d'archivage win CC	56
III-4-3-1-Definition	56
III-4-3-2-Présentation du logiciel de supervision Win CC	57
III-4-3-2-1-Création des courbes	57
III-4-3-2-2-Description de Win CC	59
III-5-Conclusion	62

### **Chapitre IV : Adaptation d'une nouvelle installation à deux moteurs asynchrones au four rotatif**

IV-1- Introduction	63
IV-2-Domaines réglementaires et normatifs	63
IV-3-Caractéristiques des récepteurs	64
IV-4-Branchement	64
IV-5-Architecture de distribution électrique	65
IV-6-Protection contre les chocs et incendies électriques	65
IV-7-Circuits et appareillage	66
IV-8-La protection contre les surtensions	67
IV-9-Les alimentations et récepteurs particuliers	67
IV-10-L'installation actuelle	67
IV-10-1-Dimensions des installations actuelles	68
IV-11-Notions pour moteur électrique	71
IV-11-1-Le modèle électrique	72
IV-11-2-Le démarrage du moteur asynchrone	74

IV-11-3- Les caractéristiques du moteur asynchrone	75
IV-11-4-Entrainement des moteurs asynchrones	79
IV-11-5-Variation de vitesse d'un moteur asynchrone	80
IV-11-6-La variation de la fréquence	80
IV-11-7-L'intérêt du moteur asynchrone	81
IV-12-Notions pour Variateur de vitesse	81
IV-12-1-Description de fonctionnement	83
IV-12-2-Schéma de câblage de variateur de vitesse	84
IV-12-3-Principe de fonctionnement de l'ensemble variateur de vitesse – moteur	85
IV-12-4-La variation et la régulation de vitesse	85
IV-12-5-L'inversion du sens de marche	85
IV-12-6-Le freinage d'arrêt	86
IV-12-7-Critères de choix d'un variateur	86
IV-12-8-Choix du variateur de fréquence	86
IV-13-Notions pour transformateur	87
IV-14-Notions pour les câbles	88
IV-14-1-Constitutions d'un câble électrique	89
IV-14-2-Détermination des sections des câbles en basse tension	89
IV-14-3-Organigramme de la méthode	90
IV-14-4- Calcul de la section technique	91
IV-14-5-Calcul de la section selon l'échauffement $S_j$	91
IV-14-6-Calcul de la section selon la chute de tension $S_z$	91
IV-15-notion pour des jeux de barres	92
IV-16-Calcul et choix de la nouvelle installation électrique	94
IV-17-Conclusion	99
Conclusion Générale	100
Références bibliographiques	
Annexe	

## Introduction générale

## Introduction générale

La machine asynchrone (MAS), de par sa simplicité de conception et d'entretien, à la faveur des industriels depuis son invention par N. TESLA, quand il découvrit les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courants polyphasés. Cette simplicité s'accompagne toutefois d'une grande complexité physique, liée aux interactions électromagnétique entre le stator et le rotor, c'est pourquoi elle a été utilisée depuis longtemps dans les entraînements à vitesse constante. La machine asynchrone est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Ses principaux avantages résident dans l'absence de machine à cage, structure simple, robuste et facile à construire. Son domaine de puissance va de quelques watts à plusieurs mégawatts, reliée directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, elle tourne à vitesse peu inférieure de la vitesse de synchronisme on dit alors qu'il y a glissement. [1]

Les nouvelles applications industrielles nécessitent des variateurs de vitesse ayant des hautes performances dynamiques, une bonne précision en régime permanent, une haute capacité de surcharge sur toute la plage de vitesse et une robustesse aux différentes perturbations. Ces dernières années, plusieurs techniques ont été développées pour permettre au variateur d'atteindre ces performances. [2]

Notre travail concerne l'étude de deux moteurs asynchrones commandés par un deux variateur de vitesse (ABB) de four rotatif au sien de la cimentier de Meftah.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la présentation de la société et connaître le processus de la fabrication de ciment au sien de la cimentier de Meftah.

Le deuxième chapitre sera consacré à donner des généralités sur les moteurs synchrones et les moteurs asynchrones. Dans sa première partie nous présenterons la définition, le principe de fonctionnement, les avantages et inconvénients des moteurs synchrones. La deuxième partie sera consacré à présenter la définition, le principe de fonctionnement, les caractéristiques, modélisation, le domaine et les avantages et inconvénients des moteurs asynchrones.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation le four rotatif à donner des généralités mécaniques, maintenance, matériel de l'automatisme, système d'archivage des fours rotatifs.

Le quatrième chapitre nous étudierons comment peut-on commander deux moteurs asynchrones par un deux variateur de vitesse par seul transformateur est les câblés qui les relie.

Enfin. Nous terminerons par une conclusion générale.

## Chapitre I : Présentation de cimenterie de Maftah

## I Introduction

Dans la fabrication du ciment il existe deux voies de production, la voie humide et la voie sèche. Dans la cimenterie de MEFTAH seule la voie sèche est utilisée. Le but de ce chapitre est de mieux comprendre le fonctionnement d'une cimenterie.

Cette société est basée sur une technologie électrique développée surtout dans les domaines d'automatisme et d'électrotechnique, et elle est aussi basée sur une main d'œuvre bien formée et qualifiée, cette industrie moderne avec 39 ans d'expérience dans ce domaine et avec son équipe technique nous sera très utile pour notre formation et pour améliorer nos capacités.

## II Présentation générale

### II-1 Présentation

La SCMI est une entreprise algérienne filiale du groupe GICA, spécialisée dans la fabrication de ciment. Le réseau national de la SCMI lui permet de fournir ses produits sur tout le territoire. Son procédé de fabrication spécifique procure à son ciment une excellente qualité respectant les normes internationales de fiabilité et de respect de l'environnement. La culture de SCMI repose sur les valeurs fondamentales de respect, de confiance, de responsabilité et d'autonomie.

L'usine possède une seule ligne de production, le procédé de fabrication est la voie sèche.



**Figure (I.1) :** la vue du SCMI.

- **Raison Sociale** : Société des Ciments de la Mitidja par Abréviation S.C.M.I.
- **Activités** : production et commercialisation des ciments ordinaires, spéciaux et tous autres matériaux de construction.
- **Forme Juridique** : Société Par Actions (S.P.A.).
- **Capital Social** : 1 400 000 000DA, détenu à 65% par le Groupe Industriel des Ciments d'Algérie (G.I.C.A.) et à 35% par le Groupe LAFARGE Financière.
- **Effective au 30 juin 2013** : 502 employés.

### II-1-1. Assiette de l'Usine

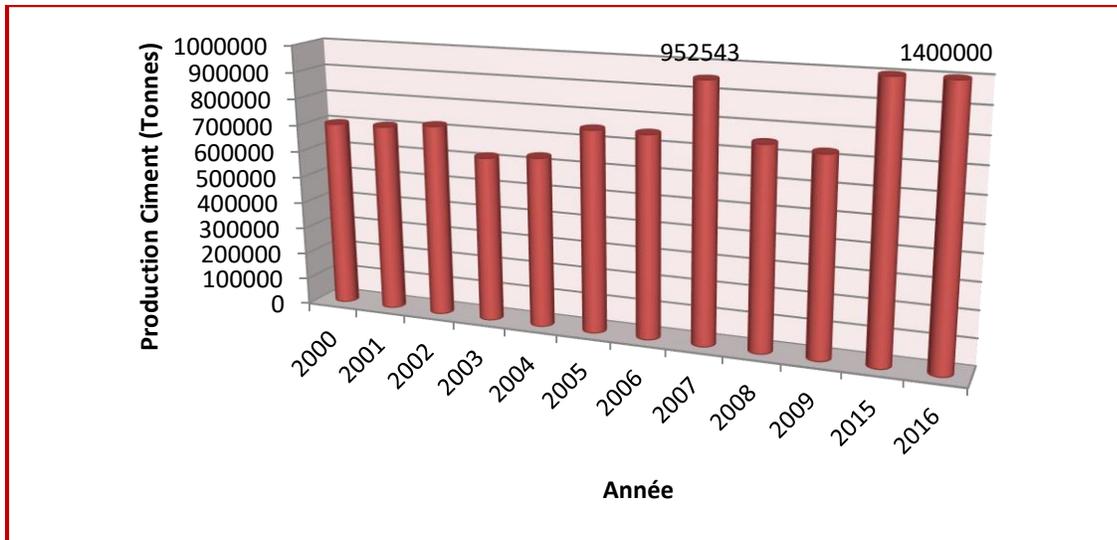
- La superficie de l'usine est de 356 811m<sup>2</sup>, dont :
  - Bâti : 72 708 m<sup>2</sup>
  - Bâtiments techniques : 42 457 m<sup>2</sup> .
  - Autres bâtiments : 22 810 m<sup>2</sup>.

### II-1-2 Historique

La cimenterie est implantée dans la commune de MEFTAHA, daïra de MEFTAHA, Wilaya de Blida. L'usine est située à 60 m au-dessous du niveau de la mer, la carrière à 150 m. Le projet s'est inscrit dans le cadre du plan quadriennal 1970-1973, il a été individualisé par décision n° 71-20 DI du 10 mars 1971, la formule de réalisation retenue est celle du lot par lot, par l'ingénieur conseil canadien SURVEYER NENNINGER et CHENEVERT (S.N.C).

Date de mise en service:

- 31 janvier 1975 : démarrage de l'atelier cru.
- 06 mai 1975 : allumage du four.
- 01 septembre 1975 : production de ciment.
- Commercialisation du ciment : 06 novembre 1975.



**Figure (I.2):** Réalisations de Ciment.

### II-1-3 Organisation de travail

✓ Matières premières :

Cette structure fonctionne en deux postes par jour, du samedi au mercredi (de 6h :00 à 13h :00 et de 13h :00 à 21h :00) et un poste le jeudi (de 6h :00 à 13h :30).

✓ Ligne de fabrication :

Les ateliers broyage cru et de le broyage ciment fonctionnent 18 heures par jour, l'atelier cuisson fonctionne 24h/24h.

Ces ateliers sont organisés en deux postes de 12 heures, 7/7 jours.

✓ Expédition :

Cette structure fonctionne en heures normales, de 08h : 00 à 16h :00.

### II-1-4 Infrastructures

**Eau :**

D'un débit de 16 à 20 L/S

L'alimentation assurée par quatre forages d'un débit de 16 à 20 L/S chacun.

- Deux à l'intérieur de l'usine.

- Deux à HNAÏCHIA (à environ 3Km).

La consommation journalière pour le processus est d'environ  $25\text{m}^3/\text{H}$  soit  $600\text{m}^3/\text{Jour}$ .

### **Energie:**

- Electricité :

L'alimentation en énergie électrique est assurée par deux lignes de 60KV et de puissance de 25 000KVA, l'une venant de l'ARBAA et l'autre d'Alger est.

La tension de sortie est de 5.5 KV.

En cas de coupure d'électricité, l'usine possède un groupe électrogène de 1 500KVA, utilisé uniquement pour le vireur du four et l'éclairage du bâtiment de commande et pour ventilation de soufflage du refroidisseur.

- Gaz :
  - Alimentée par station SONELGAZ.
  - Pression d'arrivée gaz de 5 bars.

## **III Etude descriptive de la chaine de fabrication**

### **III-1. Définition**

Ciment est un liant hydraulique obtenu par cuisson d'un mélange de calcaire et d'argile, puis broyage. La plupart des ciments sont à base de clinker et d'ajouts. Le ciment s'emploie le plus souvent sous forme de poudre : mélangé avec de l'eau, il fait prise et permet d'agglomérer entre eux des sables et des granulats (sable ou graviers), pour constituer de véritables roches artificielles, les bétons ou les mortiers.

#### **III-1-1 Les composants du ciment**

Le ciment est fabriqué généralement à partir d'un mélange de :

- Calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ).
- Argile ( $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ).

- Sable.
- Fer.



Figure (I.3): les matières premières du ciment

### III-2 Le processus de fabrication du ciment

La figure ( I.4 ) représente un schéma qui résume les différentes étapes du processus de fabrication du ciment.

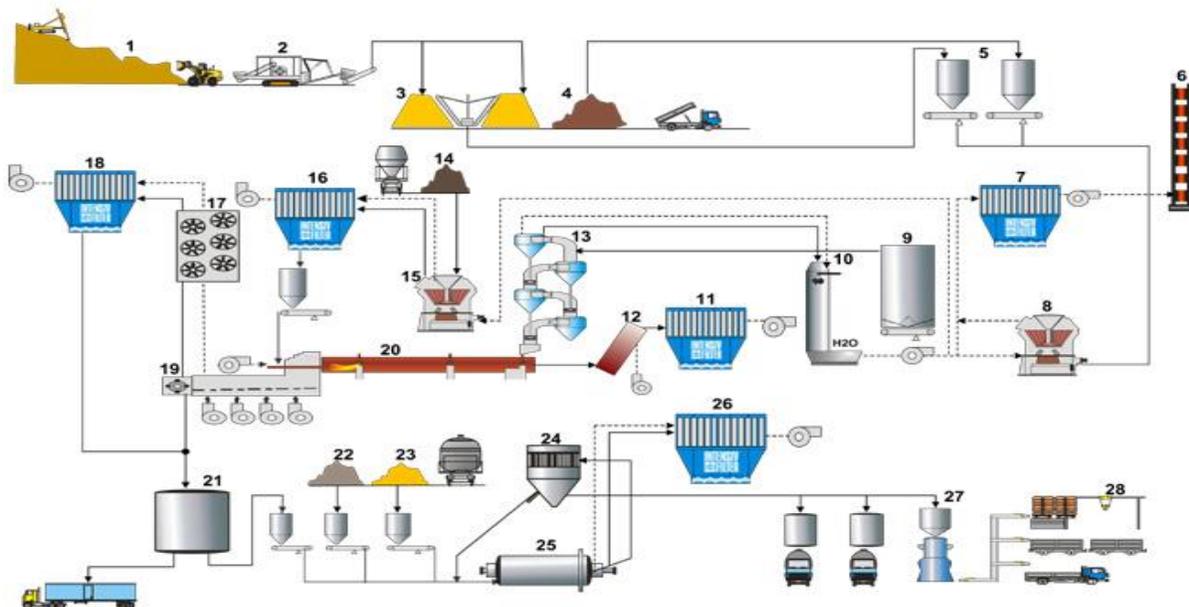


Figure (I.4): Schéma du processus de fabrication du ciment.

Ce processus de fabrication du ciment est divisé en cinq zones :

- Zone I : Carrière calcaire.
- Zone II : Cru.
- Zone III : Cuisson.
- Zone IV : Ciment.
- Zone V : Expédition.

### III-2-1 Zone I : Carrière calcaire



**Figure (I.5):** Carrière calcaire.

Dans la Zone I nous avons :

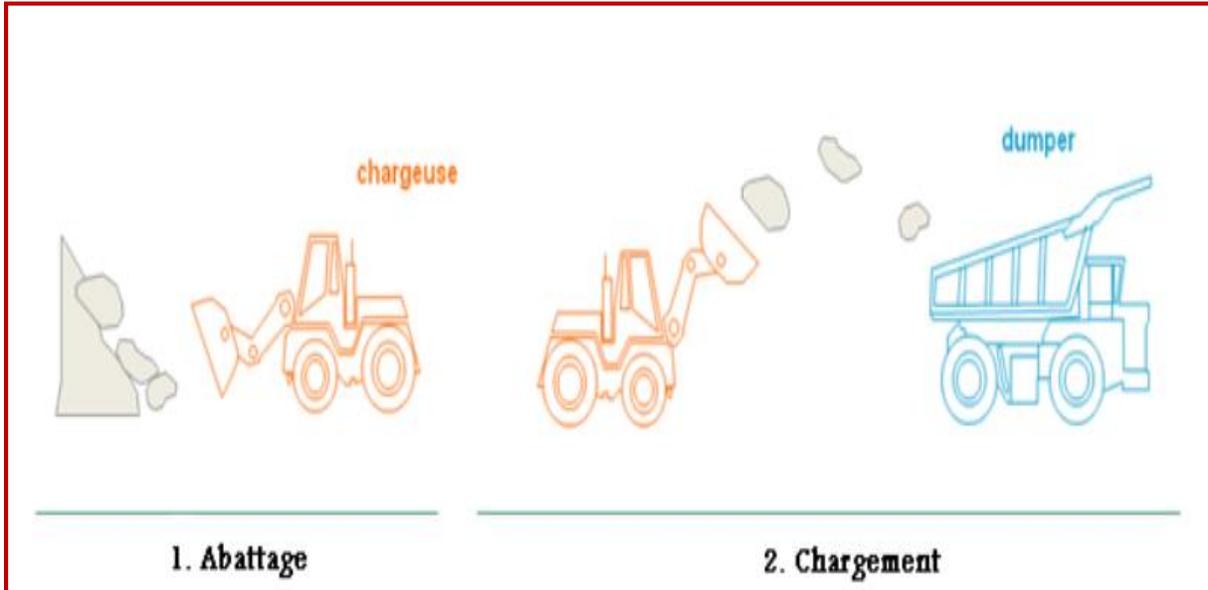
□ **L'extraction de la matière :** Les matières premières sont extraites de la carrière généralement à ciel ouvert :

- Le calcaire est extrait par abattage en grande quantité au moyen d'explosifs.
- L'argile est extraite à l'aide des pelles mécanique, elle est mélangée d'argile brune et d'argile rouge.

□ **Le chargement :** est réalisé en utilisant des engins, comme l'illustre la figure (I.6).

Il existe deux types d'engins:

- Le rôle du premier bulldozer (mini-chargeuse) est de rassembler le calcaire.
- Le rôle du deuxième (chargeuse) est de charger le calcaire dans les camions (dumper).



**Figure (I.6):** Extraction de la matière première.

□ **Le transport :** Les camions transportent le calcaire vers les concasseurs. Pour le décharger dans la chambre de concassage Figure (I.7).

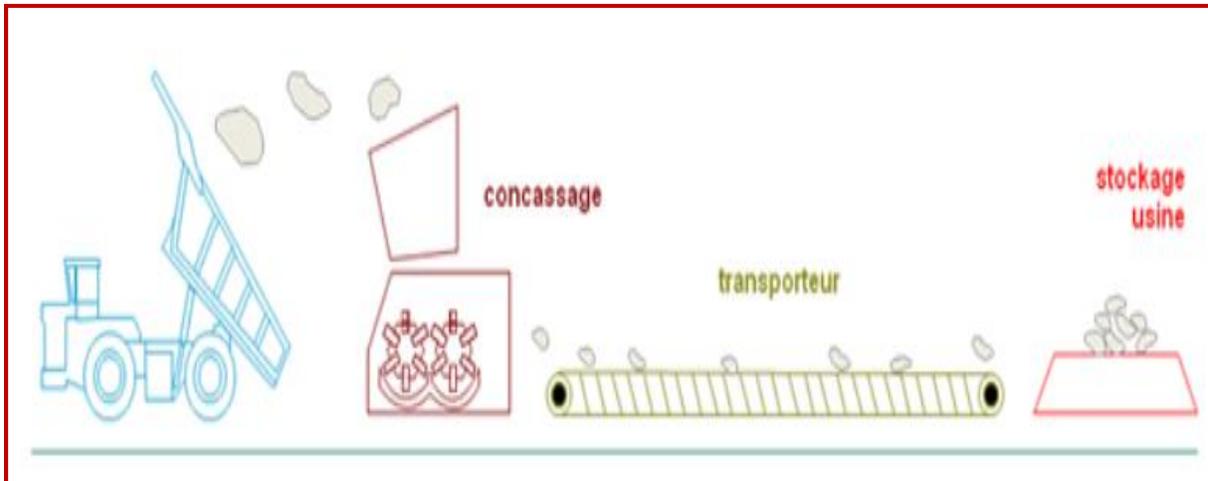


**Figure (I.7):** Déchargement du calcaire dans le concasseur.

□ **Le concassage :** Le concassage est une opération destinée à la réduction des blocs de calcaires qui sont obtenus pendant l'extraction figure ( I.8 ). Le calcaire est acheminé vers le concasseur avec ATM (Alimentation Tablier Métallique).

On trouve deux concasseurs FCB 450T/H et KHD 1000 T/H. Le concassage est réalisé par un concasseur à battoirs qui est placé près de la carrière. Ce concasseur est constitué de deux rotors, primaire et secondaire.

Il comporte aussi une chaudière pour chauffer les écrans de chocs et les parois du concasseur afin d'éviter le colmatage. Les tapis T0, T1, T2, T2 bis, transportent le calcaire vers le hall de stockage calcaire dont la capacité est de 60 000 T.



**Figure (I.8):** Concassage et transport.

### III-2-2 Zone II : Cru

L'extraction des matières premières vierges (comme le calcaire et l'argile) se fait à partir de la carrière à ciel ouvert. Le cru va suivre différentes étapes de transformation lors de sa progression. Ces étapes sont :

□ **Préparation de la matière :** On utilise deux constituants en général pour la préparation du cru qui sont le calcaire, et l'argile. Après le concassage de ces deux constituants de base on obtient une granulométrie de 0 à 25 mm. Une prise d'échantillon sera réalisée pour effectuer les analyses afin de déterminer la composition. Les constituants sont acheminés vers l'usine par des transporteurs couverts puis, ce mélange est stocké dans un hall de pré homogénéisation. Le stockeur forme deux tas l'un en constitution, l'autre en reprise. Une seconde correction est prévue juste avant le broyage cru. Cette correction se fait pour ajouter du calcaire, du minerai de fer et du sable. Après correction du cru, le mélange est

acheminé à l'aide de transporteurs vers un concasseur sécheur qui réduira la granulométrie de 0 à 7 mm.

- **Hall calcaire :** Le gratteur portique (à palette) sert à gratter le calcaire et se déplace en translation de tas en tas et jettent la matière sur le tapis 2MK 03 01 pour le transporter à la trémie calcaire.
- **Hall ajout :** Nous avons deux gratteurs semi-portique (à palette) qui servent à gratter les ajouts (argile, sable, fer).

Il déverse les produits sur les bandes transporteuses jusqu'aux trémies. Il existe quatre (04) trémies (calcaire, fer, argile, sable). Le dosage des différents constituants du ciment sont comme suit :

- Calcaire 80%
- Argile 17%
- Sable 2%
- Fer 1%

Les ajouts sont acheminés par le transporteur T13 au broyeur à marteau.

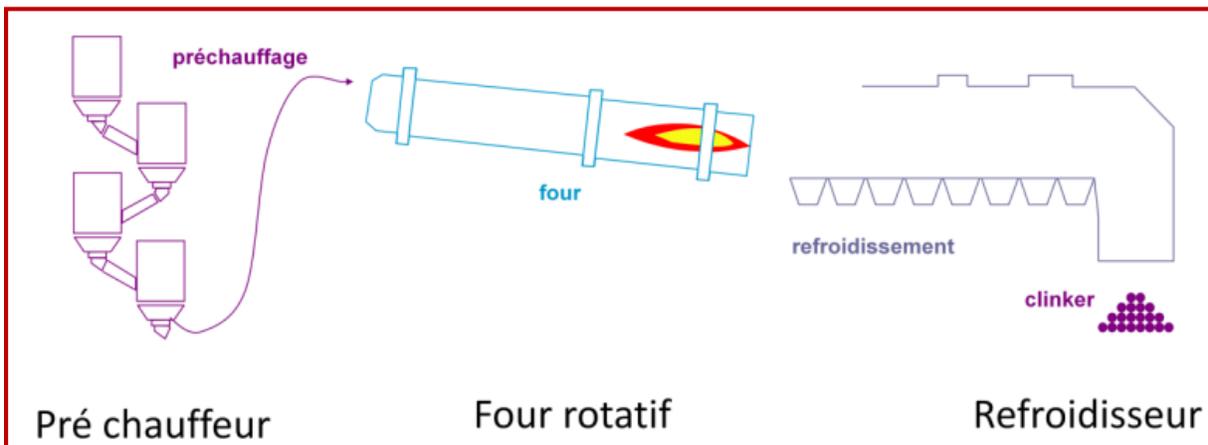
- Le broyeur à marteau :** Il sert à concasser la matière.
- L'aspiration :** Aspiration de la matière et les gaz chauds par le ventilateur de tirage d'une puissance de 1600 KW.
- Séparateur statique :** Le séparateur statique sépare la granulométrie (grosse particules et fines particules).
  - Les grosses particules passent vers les broyeurs à boulets.
  - Les fines particules partent vers le stockage (silos d'homogénéisation).
- Le broyeur à boulets :** Tous les rejets du séparateur vont passer pour être broyés dans les deux compartiments du broyeur.
- Elévateur à godets :** Il transporte le produit vers le séparateur dynamique. Le produit tombe sur un plateau qui tourne à vitesse continue. Les grosses particules tombent sur l'aéroglesseur (rejet) et retournent au broyeur pour être broyé de nouveau. Les petites particules vont vers les silos de stockage.

□ **L'homogénéisation** : Le produit sera mélangé dans les silos H1, H2 pour être prêt au stockage. La farine crue expédiée par l'air lift est dégagée dans la boîte de récupération. La capacité de stockage de chaque silo est de 10 000T. Chaque silos est équipé de deux sorties latérales pouvant assurer la totalité du débit farines vers le four. Il est donc possible de fonctionner avec un ou deux silos. Par ces étapes nous avons définies le cheminement des matières premières dans la zone cru. Le mélange est acheminé vers le four afin de permettre leurs cuissons.

### III-2-3 Zone III : Cuisson

La ligne de cuisson figure (I.9) est constituée :

- D'un pré chauffeur.
- D'un four rotatif.
- D'un refroidisseur.



**Figure (I.9):** Cuisson.

□ **Préchauffeur ou cyclones** : Les gazes réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et son eau. C'est un échangeur à contre-courant destiné à préchauffer la farine avant son entrée dans le four, en récupérant la chaleur de gaz sortant du four qui est environ égale à 100° C. Du fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70 g/cm<sup>3</sup>), un exhausteur monté sur les cyclones aspire les gazes de combustions et le mélange de la carrière.

□ **Four rotatif** : Le four est constitué d'une virole cylindrique de 90m de long et de 5.6m de diamètre protégé par la brique réfractaire), incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale. Le calcaire est chargé à l'extrémité supérieure. La figure (I.10) montre un four rotatif.



**Figure (I.10):** Four rotatif.

□ **Refroidisseur** : Le refroidisseur a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1135°C jusqu'à 80-100°C. Il est équipé d'une batterie de ventilateurs fournissant l'air de refroidissement.

### III-2-4 Zone IV : Ciment

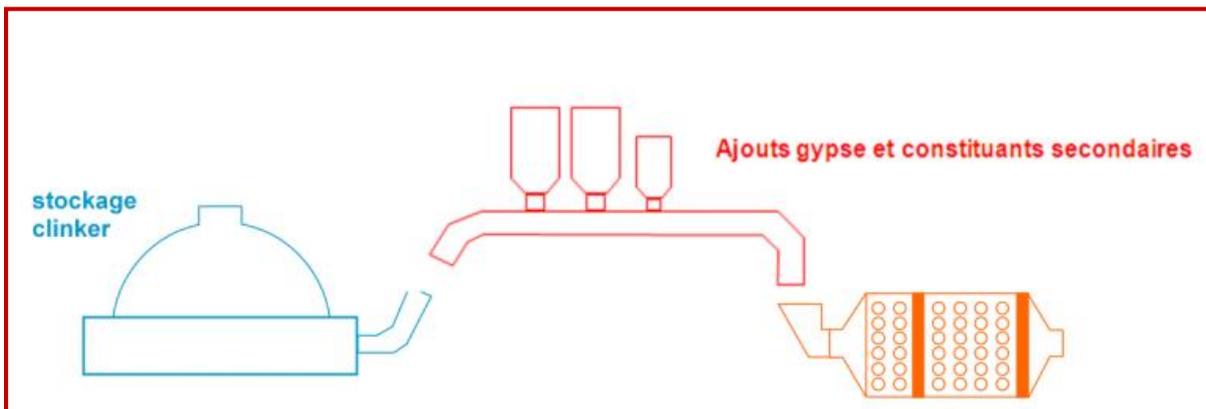
Cet atelier est composé de deux lignes électriques avec un débit de production de 90T/H pour chacune.

#### □ **Le remplissage des trémies (clinker gypse, tuf)**

- **Remplissage par la trémie de réception** : Le gypse et le tuf sont transportés vers la trémie de réception par des camions. Le gypse sera transporté sur le tapis T 19 qui déverse sur T 20. À l'aide d'un élévateur gypse, ce dernier sera stocké dans le silo de stockage gypse d'une capacité de 5000 T (silo spécial gypse). Les ajouts et gypse seront transportés du T 20 vers le tapis AMOUND et vers l'élévateur à godet qui alimente la chaîne TKF2 pour remplir la trémie tuf plus gypse.

➤ **Remplissage par T 16** : Le remplissage se fait soit directement de la zone cuisson à partir des chaînes transporteuses qui versent la matière (clinker) dans une goulotte, qui à son tour le verse sur le T16. Ce remplissage peut aussi se faire par des silos de stockages. En effet, chaque silo à trois bouches, deux bouches manuelles et une motorisée. A travers ces silos la matière est versée sur T 16 qui l'achemine vers l'élévateur à godets et est envoyé vers la chaîne TKF1 pour remplir les trémies (clinker, gypse).

□ **Broyages ciment** : Après le dosage des matières (Clinker 80%, Gypse 5%, Tuf 15%). Elles sont transportées sur un tapis vers le broyeur ciment BK1-BK2 pour le broyage figure (I.11). La matière broyée sera transportée par élévateur à godets sortie broyeur, puis elle sera déversée dans un séparateur dynamique. Les rejets seront transportés par aéroglisseur rejets vers l'entrée broyeurs pour le ré-broyage. Le produit fini (ciment) sera acheminé par aéroglisseur principal vers les silos de stockage à l'aide des élévateurs à godets sur l'air lift.



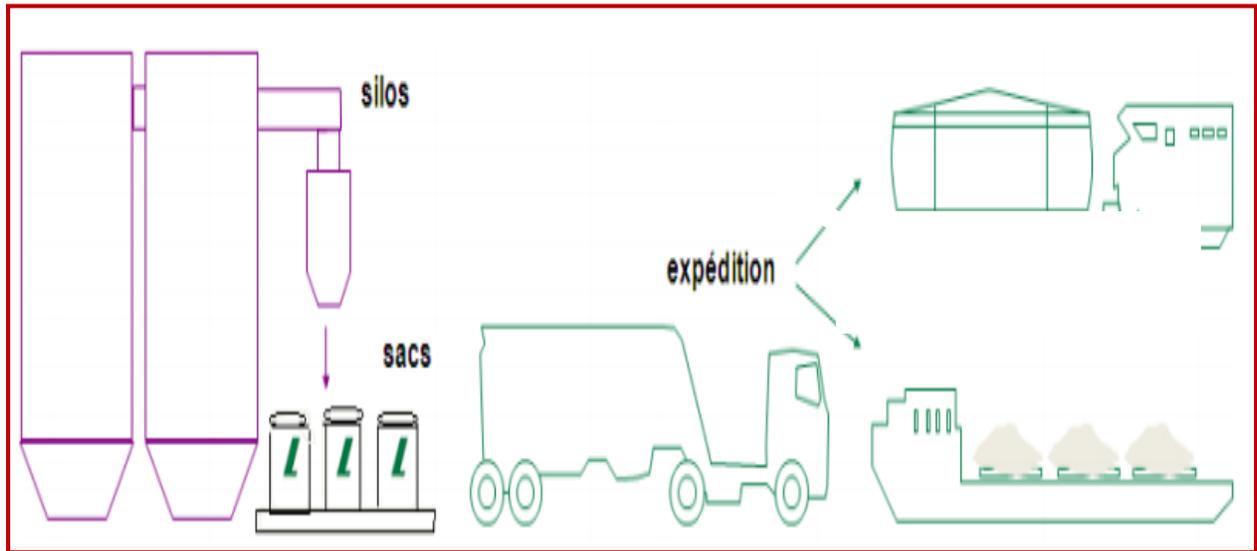
**Figure (I.11):** Broyage ciment.

### III-2-5 Zone V : Expédition

Le ciment est stocké dans huit silos avec une capacité de 500T chacun, L'expédition du ciment se fait en sac ou en vrac.

□ **Expédition en sac** : Elle est réalisée par quatre ensacheuses avec un débit de 90 T/h. Chacune possède huit becs pour le remplissage des sacs. Les sacs de 50 kg sont chargés sur des camions à bennes.

□ **Expédition en vrac :** Le remplissage se fait par un flexible branché au fond d'une trémie et qui est dirigé par l'opérateur pour le mettre à l'intérieur de la bouche de cocotte des camions pour les remplir. (La figure I-12) résume la partie expédition.



**Figure (I.12):** Expédition en sac ou vrac.



**Figure (I.13):** Expédition en vrac.



**Figure (I.14):** Expédition en sac.

## **IV Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons décrit le processus de fabrication du ciment fabriqué au sein de la cimenterie de MEFTAH.

Afin de mieux cerner ce processus nous l'avons divisé en Cinq (5) zones principales, en commençant par la partie qui nous intéresse le plus à savoir la dépoussiérage qui représente l'ENVIRO-CARE. C'est cette partie sur laquelle se basera notre travail de migration et de supervision. Pour ce faire nous étourdirons dans le chapitre suivant le fonctionnement de système.

## Chapitre II : Généralités sur les moteurs électriques

## II-1-Introduction

Une machine électrique est un dispositif électromagnétique permettant la conversion d'énergie en travail ou en énergie mécanique, ou qui fournit de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie.

Les machines électriques qui produisent une énergie électrique à partir d'une énergie Mécanique sont appelées dynamo, alternateurs ou générateurs suivant la technologie utilisée. Toutes les machines électriques étant réversibles, la distinction moteur /générateur ne se fait que sur l'usage final de la machine.

Comme toutes les machines électriques tournantes, les moteurs électriques sont constitués d'un stator (partie fixe) et d'un rotor (partie mobile).

Il existe des moteurs électriques à courant continu (DC) et des moteurs électriques à courant alternatif (AC). Dans la catégorie des moteurs à courant alternatif, on peut retrouver :

- Moteurs synchrones.
- Moteurs asynchrones.

Dans la première partie de ce chapitre nous donnerons la définition et la constitution des Moteurs synchrones.et leurs principes de fonctionnements, il s'agit d'établir les différents types des Moteurs synchrones. Ensuite nous donnerons les avantages et les inconvénients.

Dans la deuxième partie de ce chapitre nous donnerons la définition et la constitution des MAS et leurs principes de fonctionnements, il s'agit d'établir les différents types des MAS, ensuite nous donnerons les avantages et les inconvénients de ces machines et leur domaine d'application.

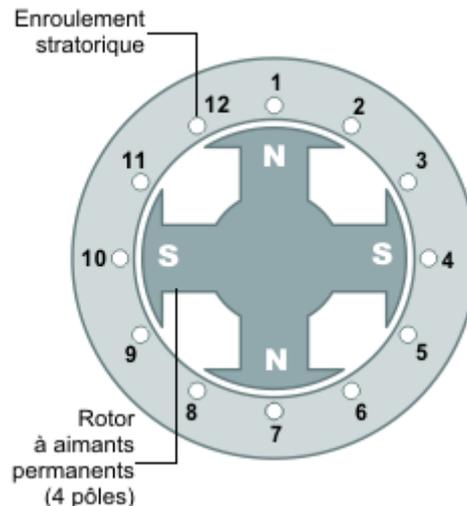
## II-2 Généralités sur les machines synchrones

### II-2.1 définition

Le moteur synchrone est aussi un moteur utilisé pour la motorisation des ascenseurs. Ces dernières années ont vu ce type de moteur revenir en force parallèlement au développement des variateurs de vitesse.

## II-2-2 Principe de fonctionnement

Le moteur synchrone se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par un entrefer. La seule différence se situe au niveau de la conception du rotor. La figure ci-dessous montre un rotor à pôles saillants constitués d'aimants permanents ou d'électro-aimants alimentés en courant continu.



**Figure(II.1) :** Rotor à pôles saillants

Après le démarrage, le moteur tourne en synchronisme avec le champ tournant. A vide les axes des pôles du champ tournant et du rotor sont confondus. En charge, les axes sont légèrement décalés. La vitesse du moteur synchrone est constante quelle que soit la charge. On notera aussi que :

- La charge (le système d'ascenseur) ne doit pas dépasser l'effort de démarrage entre le rotor et le champ tournant.
- Le couple moteur est proportionnel à la tension à ses bornes.

## II-2-3 description

Comme tout moteur, la machine synchrone est constituée d'une partie mobile : le rotor et d'une partie fixe : le stator.

**A- Stator :** Le stator est habituellement l'induit (siège de la transformation de puissance). Le stator est constitué d'un bobinage triphasé généralement couplé en étoile,

découpé en  $p$  paire de pôles. Les bobinages sont insérés dans des encoches au sein de culasse en ferrite.

**B-Rotor :** De la même manière, l'inducteur est généralement le rotor. Suivant la technologie utilisée, le champ magnétique est créé par des bobinages ou des aimants permanents. (Cf. diaporama durant le cours).

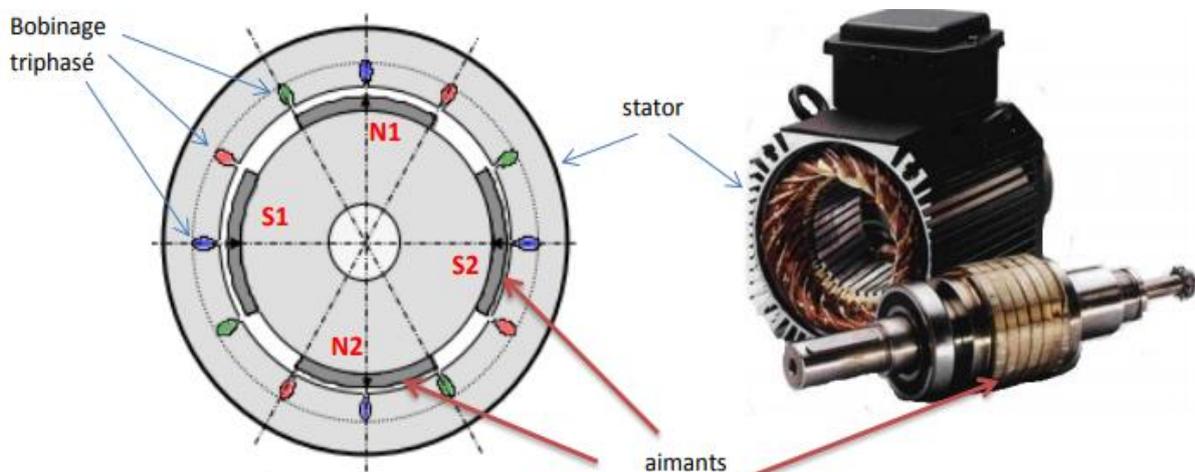
Lorsque que l'inducteur est bobiné, il est nécessaire de conserver des balais afin de l'alimenter (mais cette fois sans commutation).

Cette année, seule la machine synchrone brushless (sans balai, donc à aimants permanents) est au programme. Cette structure réserve plusieurs avantages :

- Pas de pertes au rotor.
- Pas besoin de bobinage et de balais au rotor.
- Un rotor plus léger (car aimants plus légers que les bobinages) -> servomoteurs à faible inertie donc très réactifs.
- Pour les faibles dimensions, induction plus importante.

Autrefois, cette technologie ne permettait pas de réaliser des machines de très fortes dimensions (cout trop important) mais avec les progrès réalisés sur les aimants, on observe une montée en puissance de ces moteurs.

Les aimants utilisés sont généralement soit des ferrites (faible induction mais bon marché) ou du Samarium cobalt (forte induction mais couteux).



**Figure (II.2) :** Structure d'une machine à 2 paires de pôle

### B-1 Les machines synchrones à pôles lisses

- Les pôles lisses sont utilisés pour les grandes vitesses (1500 t/min, 3000t/min).
- Une pièce d'acier forgée est placée sur l'arbre avec des encoches fraisées et des barres de cuivre isolées comme conducteurs.
- Les encoches sont fermées par des cales pour maintenir les conducteurs. [3]

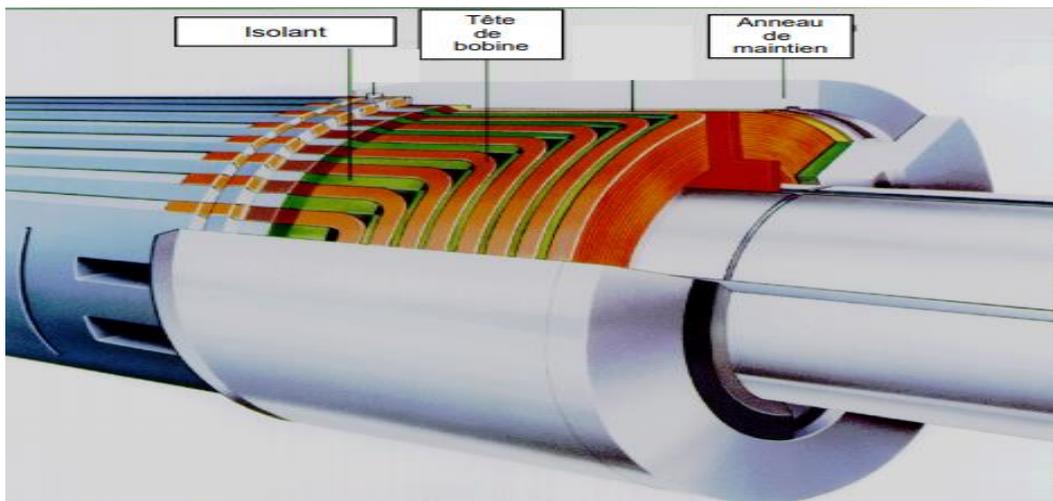


Figure (II.3) : Rotor à pôles lisses

### B-2 Les machines synchrones à pôles saillants

- Les pôles sont solidaires de l'arbre.
- Chaque pôle possède un enroulement à courant continu connecté aux bagues.
- Une source continue alimente des balais qui frottent sur les bagues.
- Un ventilateur est monté sur l'arbre pour refroidir l'ensemble stator-rotor. [3]



Figure (II.4) : Rotor d'une machine synchrone à pôles saillants.

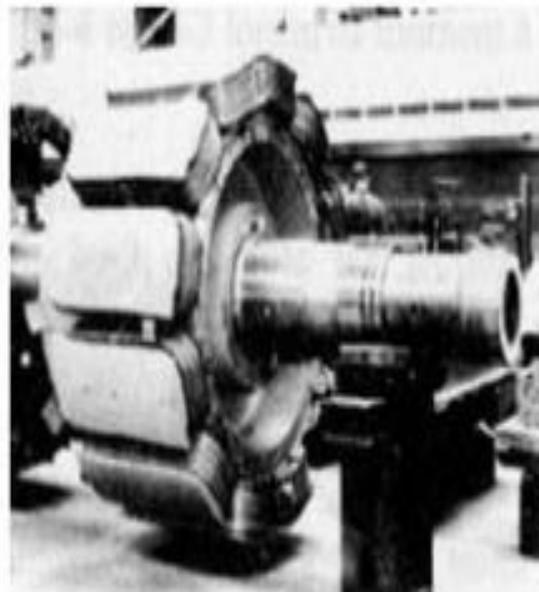
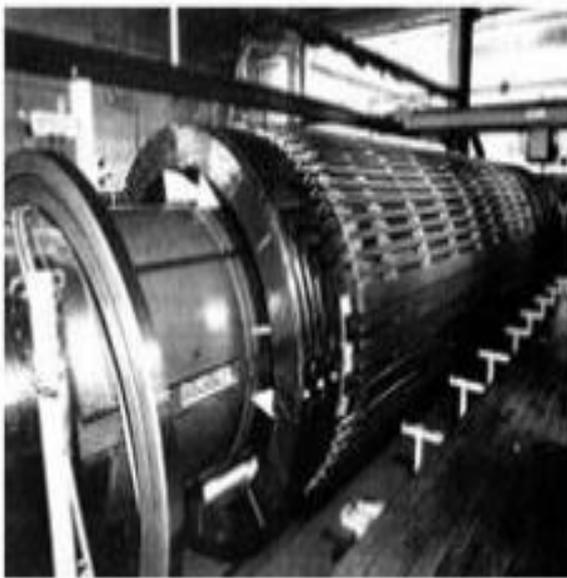


Figure (II.5) : Rotor à pôles lisses et rotor à pôles saillants.

### B-3- les machines synchrones à aimants permanents

Dont les bobinages rétorques sont remplacés par des aimants permanents pouvant se disposer de plusieurs manières sur le rotor.

### B-4-les machines synchrones à reluctance variable

Elles possèdent un rotor à pôles saillants sans bobinage. La culasse sert de support et de circuit de fermeture de flux. Elle joue également le rôle d'enveloppe assurant la protection.

## II-3 généralités sur les moteurs asynchrones

### II-3-1 définition

Le moteur asynchrone triphasé est largement utilisé en climatisation du fait essentiellement de sa fiabilité, de sa robustesse, du peu d'entretien qu'il demande et de son prix.

Il est constitué d'une partie fixe le stator, logé dans une carcasse en acier trois enroulements ou bobinage sont raccordés à une plaque à borne permettant le branchement sur le réseau, et d'une partie mobile le rotor qui est soit à cage d'écureuil ou de type rotor bobiné. [4].

### II-3-2 Constitution

Deux composantes principales constituent les moteurs asynchrones, elles sont faites de tôle d'acier et comportent des encoches dans lesquelles on place les enroulements. L'une des composantes appelée le stator, il est fixe, produit un champ magnétique tournant ; on y trouve les enroulements reliés à la source. L'autre composante, nommée le rotor, il est monté sur un axe et libre de tourner, Entraîné par un champ tournant, et il produit de l'énergie mécanique. [5]

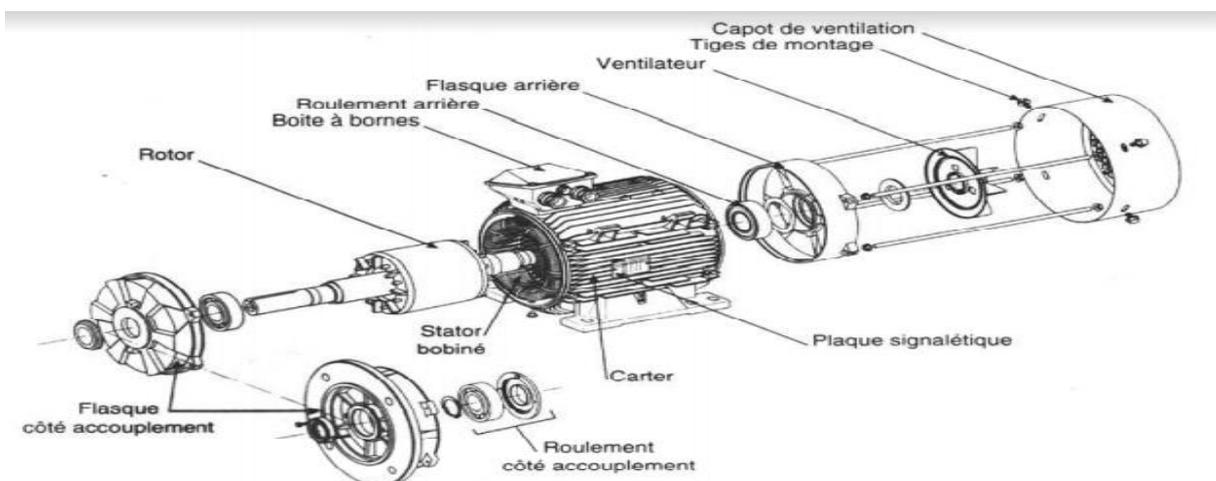


Figure (II.6) : Constitution d'un moteur asynchrone [11]

## A- Le stator

Dans tous les cas, le stator reste au moins dans son principe, le même ; il est constitué d'un enroulement bobiné réparti à l'intérieur d'une carcasse cylindrique faisant office de bâti, et logé à l'intérieur d'un circuit magnétique supporté par cette carcasse.

Ce circuit magnétique est formé d'un empilage de tôles, en forme de couronnes circulaires, dans lesquelles sont découpées les encoches parallèles à l'axe de la machine.



Figure (II.7) : Stator Avec bobinage



Figure (II.8) : Stator sans bobinage

**B- Le rotor :** Le rotor est fait comme le stator, c'est un empilage de tôles magnétique en acier formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur, il forme la partie mobile du moteur ; et il est placé à l'intérieur du stator. Il tourne à une vitesse inférieure à la vitesse du champ tournant ; parmi les rotors on distingue :

### ➤ Rotor à cage

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du rotor bobiné.

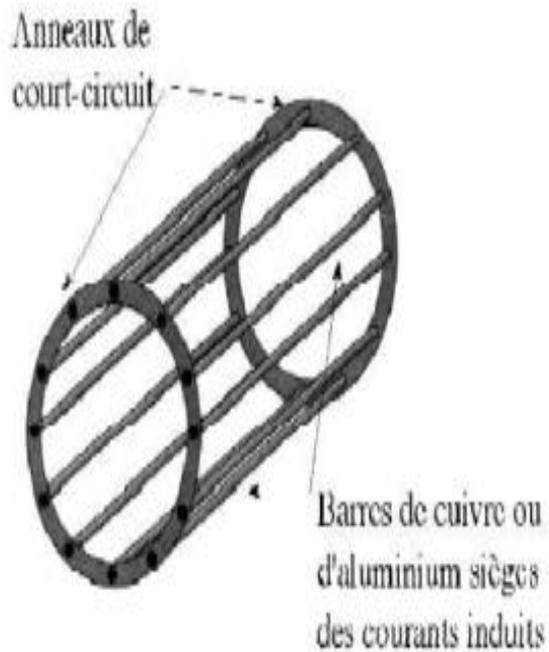
Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur.

Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (230/400v), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.

Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champs tandis que les barres accueillent les courants induits.



**Figure (II.9) :** Rotor à simple cage



**Figure (II.10) :** Cage d'écureuil

### ➤ Rotor à double cage

Ce rotor comporte deux cages, l'une extérieure assez résistante faible résistance.

Au début du démarrage, le flux étant à fréquence élevée, les courants induits sont dans la cage intérieure. Le couple produit par la cage extérieure est important et l'appel de courant réduit.

En fin de démarrage, la fréquence diminue dans le rotor et le passage du flux à travers la cage intérieure est plus facile.



Figure (II.11) : Rotor à double cage

➤ **Rotor bobiné (rotor à bagues)**

C'est un cylindre constitué de tôles empilées solidaire sur l'Ardre du moteur, les encoches sont percées dans ses tôles. Près de la surface de ce cylindre, des conducteurs passent dans ses encoches et sont réunis à une de leur extrémité en court-circuit, l'autre extrémité est raccordée à 3 bagues permettent une liaison avec un circuit fixe (des résistances).

Les pôles du rotor sont en même nombre que le stator. Sur les bagues viennent frotter des balais raccordés au dispositif de démarrage.



Figure (II.12) : Rotor à bagues.

### ➤ Rotor à encoches profondes

Comporte une cage rotorique simple avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique. L'effet de peau limite la pénétration du champ magnétique dans le rotor, et ce, d'autant plus que la fréquence est élevée.

A la mise sous tension, le rotor est immobile et les courants induits dans les barres rotoriques, à la fréquence de l'alimentation du stator se concentrent à la périphérie du rotor, ce qui correspond à une cage de forte résistance. Quand la vitesse augmente, la fréquence des courants induits diminue et la profondeur de pénétration du champ magnétique augmente. La cage présente ainsi une résistance plus faible en régime permanent.

## II-3-3 Modélisation de la machine asynchrone

### II-3-3-1 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- L'effet d'encochage est négligeable.
- Distribution spatiale des forces magnétomotrices d'entrefer est sinusoïdale.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Pertes ferromagnétiques négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas en fonction de la température de fonctionnement et on néglige également l'effet de peau. [6]

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

La structure principale de la machine asynchrone est représentée par la figure (II.13) elle est composée de six enroulements dans l'espace électrique, les axes statoriques sont décalés entre eux d'un angle ( $2\pi/3$ ), ainsi que les axes rotoriques. L'angle ( $\theta$ ) représente l'angle entre

l'axe de la phase rotorique de référence ( $R_a$ ) et l'axe fixe de la phase statorique de référence ( $S_a$ ). Les flux sont considérés positifs selon le sens des axes des enroulements de la machine asynchrone.

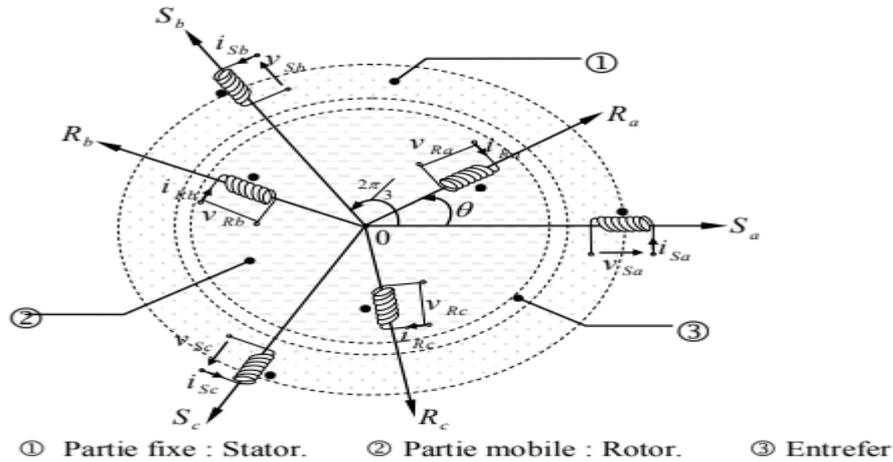


Figure (II.13) : Modèle d'une machine asynchrone triphasée

### II-3-3-2-Équations électriques

Les équations de tension des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques sont:

$$\begin{cases} V_{sa} = r_s i_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \\ V_{sb} = r_s i_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \\ V_{sc} = r_s i_{sc} + \frac{d\phi_{sc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II -1})$$

$$\begin{cases} V_{ra} = r_r i_{ra} + \frac{d\phi_{ra}}{dt} \\ V_{rb} = r_r i_{rb} + \frac{d\phi_{rb}}{dt} \\ V_{rc} = r_r i_{rc} + \frac{d\phi_{rc}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II -2})$$

En désignant par :

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Les tensions appliquées aux trois phases statoriques.

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : les tensions appliquées aux trois phases rotorique.

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Les courants qui traversent les trois phases statoriques.

$I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$  : Les courants qui traversent les trois phases rotorique.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$  : Les flux totaux à travers ces enroulements.

$r_s$ : Résistance d'une phase statorique.

$R_r$  : Résistance d'une phase rotorique. [7]

Les équations (I-1) et (I-2) peuvent être écrits sous la forme matricielle suivante:

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II -3})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$[V_{sabc}] = [r_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II -4})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II -5})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$[V_{rabc}] = [r_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II -6})$$

### II-3-3-3 Equation magnétique

Pour le stator :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \quad (\text{II -7})$$

Pour le rotor :

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \quad (\text{II -8})$$

Talque :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (\text{II -9})$$

On désigne par :

$[L_{ss}]$  : Matrice des inductances statoriques.

$[L_{rr}]$  : Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$  : Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$  : Matrice des inductances mutuelles rotoriques. [7]

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{II -10})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II -11})$$

Avec :

$L_s$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$L_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$  : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotorique.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = m \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos(\theta_r) & \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (\text{II -12})$$

$\theta_r$ : Angle qui définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phase Statoriques et rotoriques.

$m$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique lorsque les deux axes se coïncident.

### II-3-3-4 Equations mécaniques

L'équation de mouvement est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = C_e - C_r - f\Omega_r \quad (\text{II -13})$$

$J$  : Moment d'inertie des masses tournantes.

$C_r$  : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

$C_e$  : Couple électromagnétique.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

$\Omega_r$  : vitesse mécanique en rad/s

Le couple est donné par l'expression suivante :

$$C_e = P [i_{sa} i_{sb} i_{sc}] \frac{d}{dt} \left( [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \right) \quad (\text{II -14})$$

Les équations précédentes font apparaître des difficultés pour la résolution analytique du fait que les termes trigonométriques de la matrice des inductances varient en fonction de la position. Cela conduit à l'usage de la transformation de Park, qui permettra de rendre ces termes indépendants de la position.

### II-3-4 Caractéristiques mécaniques couple / vitesse

La figure (II.7) donne la caractéristique généralisée du couple en fonction de la vitesse pour les trois modes de fonctionnement d'une machine asynchrone.

La machine fonctionne normalement comme moteur, développant un couple variant entre zéro et le couple de pleine charge  $C_n$ . Or, entre ces limites, la courbe donnant le couple en fonction de la vitesse est essentiellement une ligne droite. A tension constante, la pente de cette droite dépend surtout de la résistance du rotor: plus la résistance est grande, plus la pente est faible.

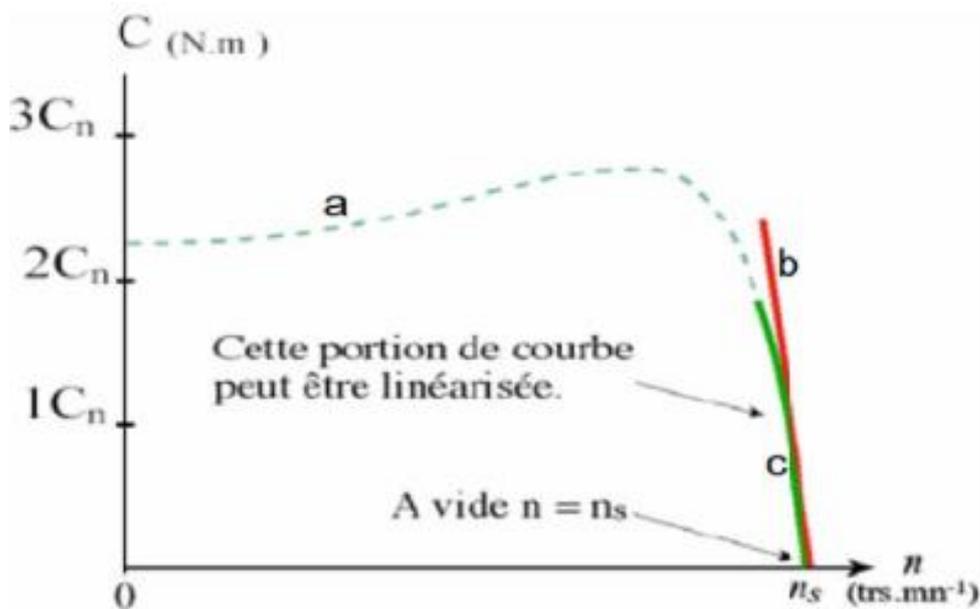


Figure (II.14) : Caractéristique mécanique.

- $C_n$  : Couple nominal.

-**a** : Couple de démarrage du moteur. On constate que ce couple est fort, la machine peut démarrer en charge.

-**b** : La zone de fonctionnement peut être modélisée par une droite.

-c : Zone de fonctionnement du moteur. On constate qu'elle est presque linéaire, cette partie de la courbe est très verticale la vitesse varie peu avec la charge.

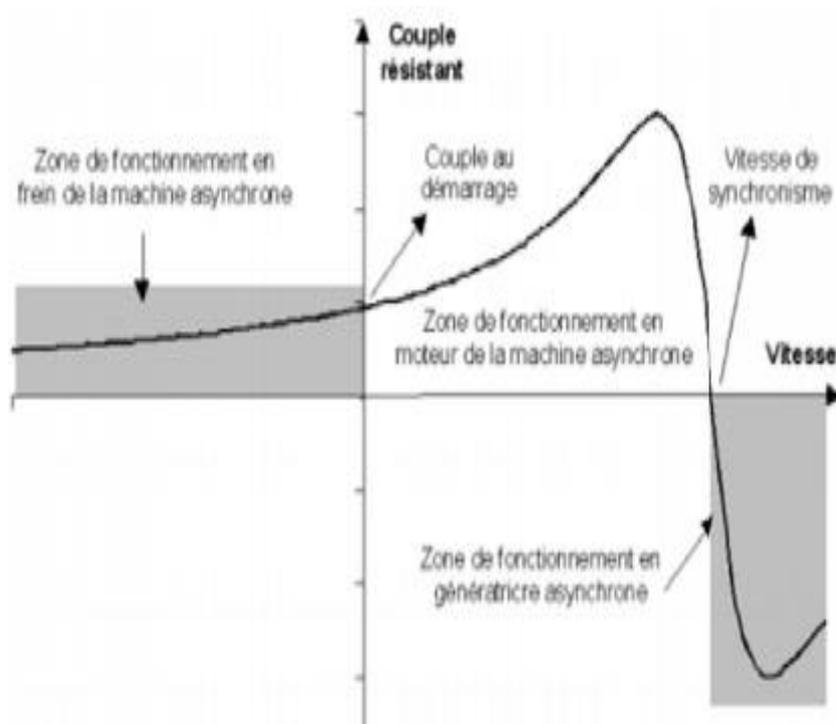


Figure (II.15) : les trois domaines de fonctionnement de la machine.

### II-3-5 Couple du moteur asynchrone

La définition du couple électromagnétique c'est :

$$C_e = \frac{p_e}{\Omega_s} \quad (\text{II -15})$$

Et celle du couple utile :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \quad (\text{II -16})$$

La relation entre  $C_u$  et  $C_e$  découle de ces deux définitions :

$$\frac{P_M}{\Omega} = \frac{(1-g).p_e}{(1-g).\Omega_s} \quad (\text{II -17})$$

D'où :

$$C_e = \frac{P_M}{\Omega} = P_u + \frac{P_m}{\Omega} = C_u + \frac{P_m}{\Omega} \quad (\text{II -18})$$

En définitive :

$$C_u = C_e - \frac{P_m}{\Omega} \quad (\text{II -19})$$

Le couple électromagnétique est égal au couple utile quand les pertes mécaniques sont négligeables.

Avec :

$C_u$ : Couple utile [N.m]

$C_e$ : Couple électromagnétique [N.m]

$P_{js}$ : Pertes joule statorique [W]

$p_e$ : Puissance transmise au rotor [W]

$P_M$ : Perte mécanique

### II-3-6 Classification des moteurs asynchrones

Les moteurs asynchrones sont classés selon les conditions environnementales dont ils seront exposés et selon leurs caractéristiques électriques et mécaniques dont on citera les principales catégories qui suivent :

#### A-Moteur à couple de démarrage normal (classe B)

La grande majorité des moteurs asynchrones appartient à ce groupe. Ces moteurs, d'usage général, peuvent entraîner des ventilateurs, des pompes centrifuges, des machines utiles, etc.

### B-Moteur à couple de démarrage élevé (classe C)

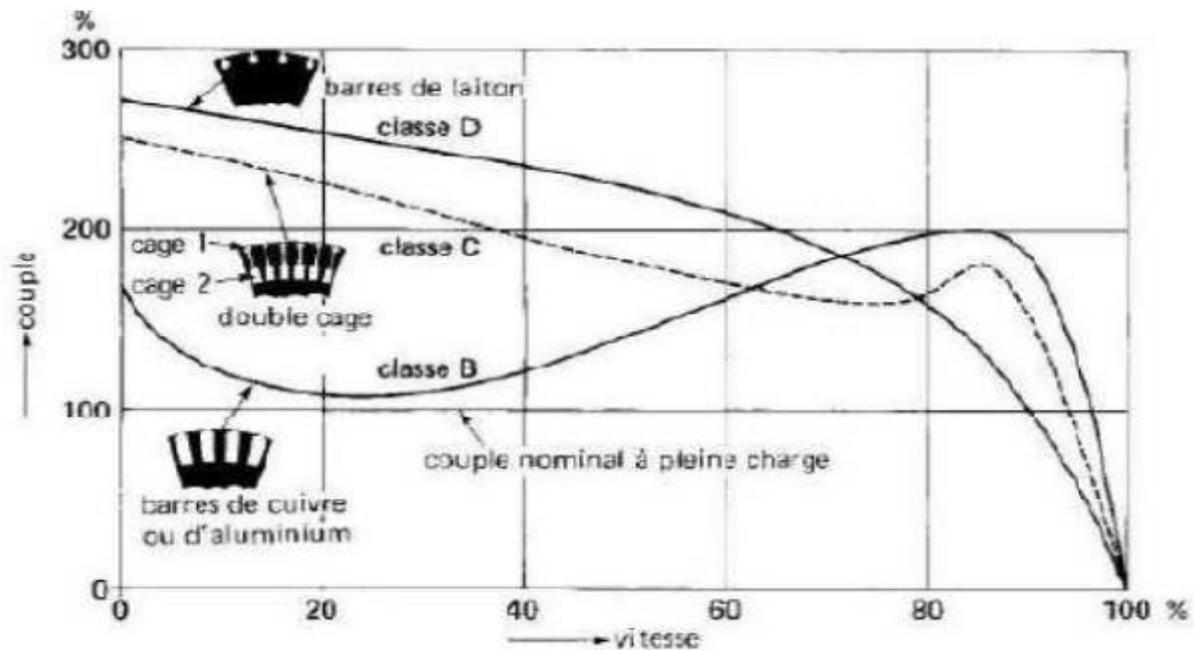
Ces moteurs comportent, en général, un rotor à double cages. Ils sont utilisés dans les cas où le démarrage est difficile ou d'une durée plutôt longue. Par exemple les pompes et les compresseurs à piston

### C-Moteur à glissement élevé (classe D)

Ce sont des moteurs à glissement élevé, avec un courant de démarrage plus faible, leur vitesse nominale est d'environ 10% plus faible que leur vitesse synchrone, leur régime de charge doit être intermittent afin de prévenir tout échauffement excessif.

Ils sont utilisés dans le cas où le démarrage est lent (comme un séchoir centrifuge) et pour l'entraînement de machines telles que les cisailles, poinçonneuses et presses. La cage d'écurieil de ces moteurs est faite en laiton pour augmenter sa résistance.

Les caractéristiques couple-vitesse de ces différents moteurs, ainsi que les détails de construction de leurs rotors sont représentés sur la figure suivante : [8]



**Figure (II.16) :** Courbe du couple en fonction de la vitesse pour moteurs de classe B, C et D. Le Coupe du rotor indique le genre de conducteurs utilisés. [8]

### II-3-7 Bobinage

On peut effectuer le bobinage d'une machine tournante de plusieurs façons, mais on utilise habituellement deux enroulements à une seule ou à deux couches au stator, mais vu la forme des sections on distingue trois types d'enroulements les plus utilisées l'enroulement concentrique, imbriqué et ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications. L'enroulement imbriqué est le type de bobinage le plus employé dans les stators des moteurs triphasés des moyennes et grandes puissances. Même si ce type de bobinage peut être à simple couche, on choisit plutôt de le construire à double couche ; chaque bobine est formée de la moitié des conducteurs contenus dans une encoche et disposée de façon que l'un des côtés de la bobine soit dans le haut d'une encoche (coté supérieur) et l'autre dans le fond (coté inférieur). Puisque les bobines d'un enroulement imbriqué à double couches n'occupent que la moitié de l'encoche, on peut modifier la largeur et les placer dans une paire d'encoches qui ne correspond plus au pas d'encoche normal. Les bobines sont habituellement de largeur réduite et donnent un pas dit raccourci.

Cette configuration complique le bobinage et sa mise en place, mais présente l'avantage, si le choix du pas raccourci est judicieux, d'atténuer les harmoniques de l'onde de flux et d'améliorer ainsi le comportement du moteur.

-L'enroulement ondulé est idéal pour les rotors des moteurs asynchrones à bagues.

-Dans le cas de petits moteurs asynchrones, particulièrement lorsque le bobinage est mécanisé ; on utilise généralement l'enroulement concentrique.

-La disposition de bobinage dans les encoches différencie ces différents types d'enroulements.

[9]

### II-3-8 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du moteur asynchrone triphasé est basé sur l'application de trois principes fondamentaux :

- Théorème d'Ampère (principe I).

- Loi de Faraday (principe II).

- Loi de Lenz (principe III).

Au moment où l'on ferme l'interrupteur, les enroulements statoriques à P pair de pôles seront branchés sur un système de tension triphasée équilibré et se trouvent parcourus par un système du courant également triphasé équilibré de même pulsation électrique.

Ces courants donnent naissance à une F mm tournante et par la suite un flux magnétique tournant (Principe I).

Les enroulements rotoriques voient défiler les P paires de pôles du champ tournant statorique et donc traversés par un flux qui varie sinusoïdalement dans le temps (principe III). Aux bornes de ces enroulements va apparaître un système de Fem induite triphasé équilibré (principe II).

Comme ces enroulements sont fermés sur eux même, ils seront alors parcourus par un système du courant triphasé équilibré, ces derniers vont créer à leurs tours une F mm et par la suite un flux magnétique tournant à P paires de pôles. Par conséquent les deux F mm ainsi que les deux flux (flux statorique et rotorique) tournent à la même pulsation de rotation par rapport au stator. L'interaction entre les deux champs tournants donne naissance au couple électromagnétique de la machine. [10]

### II-3-9 Définition du glissement

Le glissement qu'on note « g » est une grandeur qui rend compte de l'écart de vitesse de rotation d'une machine asynchrone par rapport à la vitesse de rotation de son champ statorique. Il doit y avoir une différence de vitesse pour que ce type de moteur fonctionne car c'est le décalage entre le rotor et le champ statorique qui provoque l'apparition des courants induits au rotor, courants qui créent le champ rotorique.

On écrit alors :

$$g = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} * 100 \quad (\text{II -20})$$

- On désigne par  $N_s$  la fréquence de rotation du champ statorique dans la machine.

- On désigne par  $N_r$  la fréquence de rotation de la machine.

En régime, le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour cents : de 2 % pour les machines les plus grosses à 6 ou 7 % pour les petites machines triphasées, il peut atteindre 10 % pour les petites machines monophasées. Les pertes par effet joule dans le rotor étant proportionnelles au glissement, une machine de qualité se doit de fonctionner avec un faible glissement.

- ✓ Le glissement peut aussi être calculé à partir des vitesses angulaires

Avec :

$$g = \frac{(W_s - W_r)}{W_s} * 100 \quad (\text{II -21})$$

- $W_s$  la vitesse angulaire de synchronisme du champ statorique dans la machine.
- $W_r$  la vitesse angulaire de rotation de la machine.

### II-3-10 Quadrants de fonctionnement

La machine asynchrone peut fonctionner dans quatre quadrants, les modes de fonctionnements possibles sont :

**-Unidirectionnel** : le passage de l'énergie ne peut se faire que dans le sens réseau vers le moteur (quadrants 2 et 4 seuls).

**-Bidirectionnel** : l'énergie peut circuler dans les deux sens. la machine synchrone peut fonctionner en moteur (quadrants 2 et 4) ou en alternateur (1 et 3).

On utilise ici la réversibilité de la machine asynchrone soit pour réinjecter l'énergie dans le réseau, soit pour obtenir un couple de freinage.

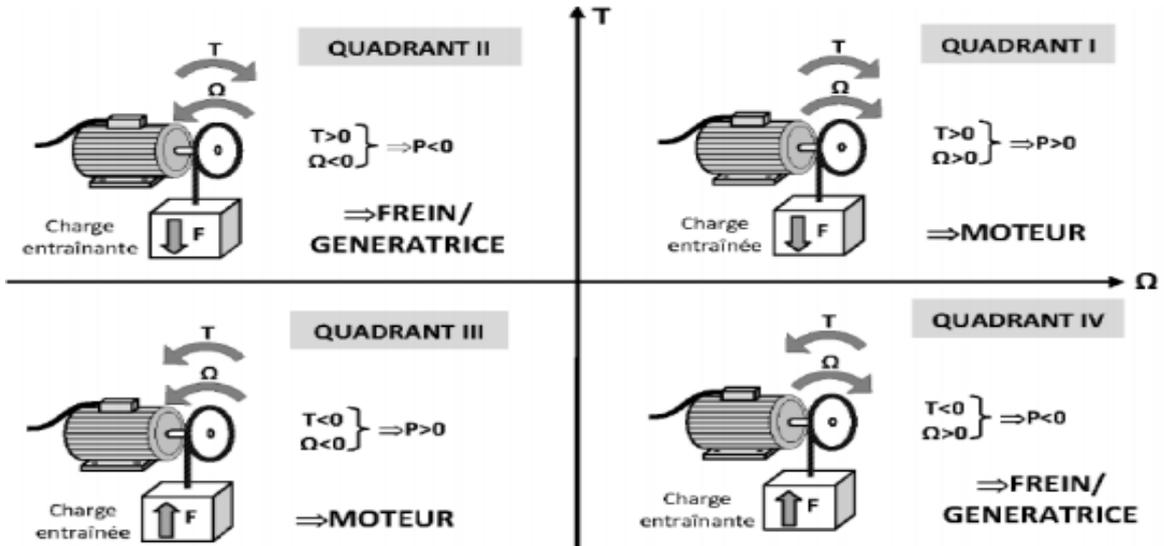


Figure (II.17) : Quadrants de fonctionnement

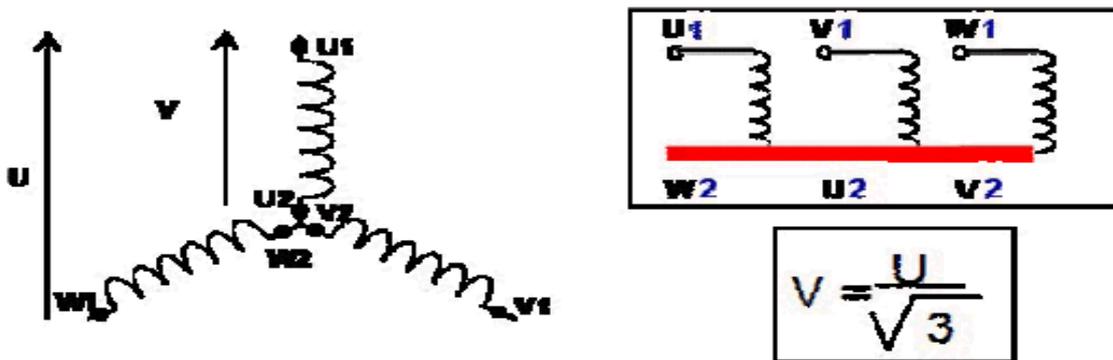
### II-3-11 Connexion au réseau

Le stator des moteurs asynchrones standards possède trois enroulements reliés à une plaque à borne comportant six bornes repérées U1, V1, W1 et U2, V2, W2. Les enroulements sont branchés de telle sorte que la tension du réseau corresponde à la tension qui supporte un enroulement du moteur :

#### A-Couplage étoile

Dans le montage étoile, chaque enroulement est soumis à la tension simple V tension entre phase et neutre. Chaque enroulement est traversé par le courant de ligne I. Si la plus grande tension de la plaque signalétique du moteur correspond à la tension entre phases du réseau, on choisit le couplage étoile :

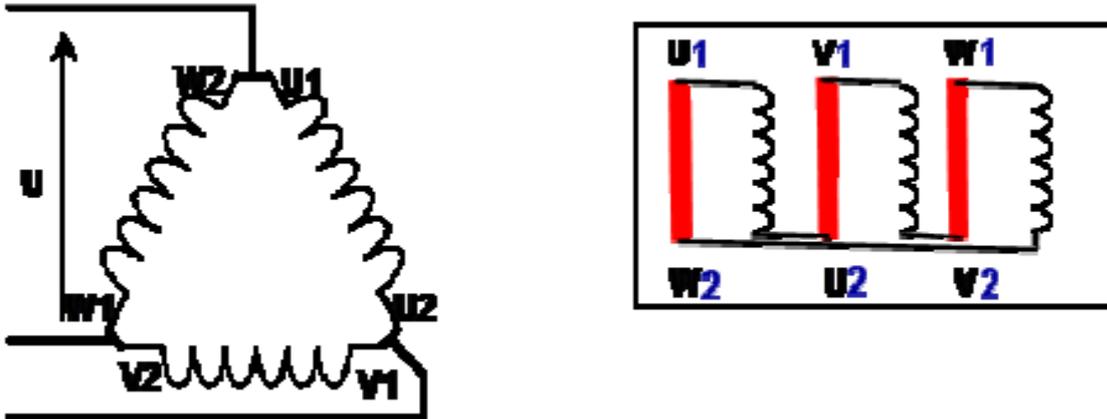
$$V = \frac{U}{\sqrt{3}}$$



Figure(II.18) : schéma de couplage étoile.

## B-Couplage triangle

Dans le montage triangle, un enroulement est câblé entre deux fils de phases, avec une tension composée  $U$  et chaque enroulement est traversé par un courant de valeur efficace  $J$ . Si la tension est petite élevée, elle correspond à la tension du réseau (le couplage sera triangle).



Figure(II.19) : schéma de couplage triangle

### II-3-12 Bilan de puissances

- La puissance absorbée :

$$P_a = \sqrt{3} * U * I * \cos \varphi \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$U$  : est la tension composée du réseau (V)

$I$  : est le courant en phase (A)

$\varphi$  : est le déphasage entre le courant et la tension

- Pertes : -Joule stator :

$$P_{js} = \frac{3}{2} RI^2 \quad (\text{II.23})$$

- Pertes : - Joule rotor :

$$P_{jr} = \frac{3}{2}RI^2 \tag{II.24}$$

- La puissance utile :

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi - \text{pertes} \tag{II.25}$$

- Puissance transmise au rotor :

$$P_{ele} = P_u - \text{pertes stator} = P_a - P_{js} - P_{fs} \tag{II.26}$$

- Puissance mécanique :

$$P_m = P_{ele} - P_{jr} \tag{II.27}$$

Les pertes joules rotor sont égales au produit du glissement par la puissance transmise la figure si dessous représente le bilan des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone .

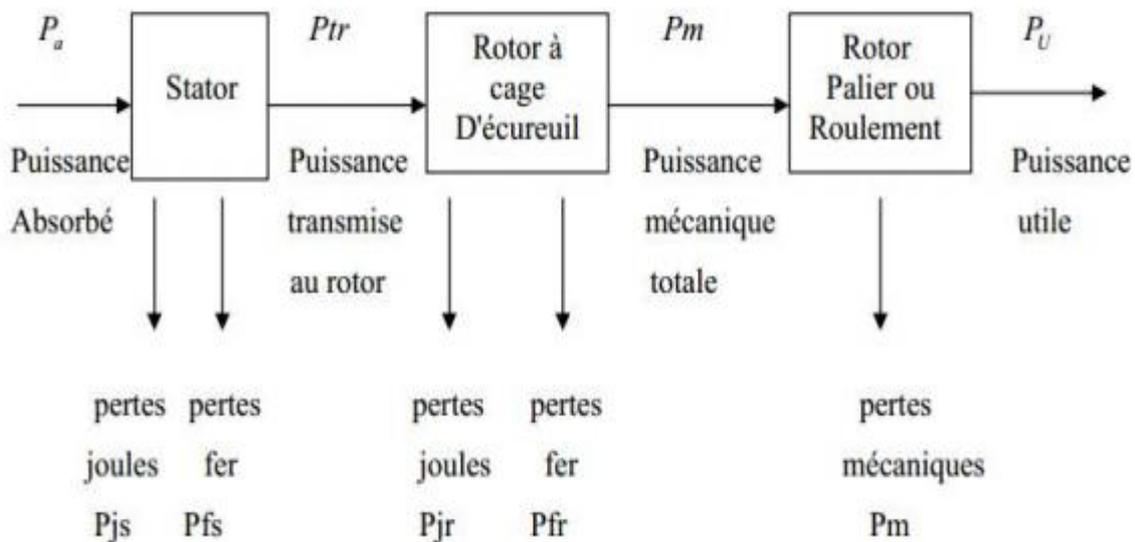


Figure (II.20) : Bilan des puissances et des pertes.

### II-3-13 Rendement d'un moteur asynchrone triphasé

Le rendement  $\eta$  du moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile qu'il fournit et la puissance électrique qu'il absorbe.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} [\%] \quad (\text{II.27})$$

$P_u$  : puissance fournie par le moteur asynchrone triphasé.

$P_a$  : puissance absorbée par le moteur asynchrone triphasé.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{pu}{pu - (pjs + pfr + pjr + pc)} \quad (\text{II.27})$$

Le rendement est toujours inférieur à l'unité ( $\eta < 1$ ) et il est d'autant plus voisin de l'unité que le rapport des pertes à la puissance utile transformée dans la machine est plus faible. Pour éviter un échauffement excessif de la machine, les pertes qui s'y dérogent sous forme calorifique doivent être évacuées vers l'extérieur à l'aide d'un système de refroidissement dans lequel circule un fluide refroidisseur, un gaz ou un liquide. [7]

### II-3-14 Plaque signalétique

La plaque signalétique spécifie les valeurs du point de fonctionnement nominal (point pour lequel le moteur fonctionne normalement) : [5]



Figure (II.21) : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone triphasé.

## II-3-15 Avantages et inconvénients des machines électriques

### A-Avantages et inconvénients des machines synchrones

Les avantages et inconvénients du moteur synchrone sont repris ci-dessous :

#### Les avantages :

- Il peut travailler avec un facteur de puissance proche de 1 ( $\cos \varphi \sim 1$ ). Il contribue donc à redresser le  $\cos \varphi$  global de l'installation électrique.
- La vitesse du moteur est constante quelle que soit la charge (intéressant dans le cas des ascenseurs).
- Il peut supporter des chutes de tension importantes sans décrocher.

#### Les inconvénients :

- S'il n'est pas associé à un variateur de vitesse, il a des difficultés à démarrer.
- Il peut décrocher en cas de forte charge (pas intéressant au niveau des ascenseurs nécessitant un couple important).
- Nécessite une conversion électrique afin de garder une fréquence constante (Courant alternatif  $\rightarrow$  Courant continu  $\rightarrow$  Courant alternatif)
- La construction de la génératrice requiert des aimants permanents particulièrement gourmands en terres rares (lanthanides)
- Problèmes de démagnétisation et de défluxage.

### B-Avantages et inconvénients des machines asynchrones

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés. [11]

#### Les avantages :

- Structure simple.
- Robuste et facile à construire.
- Coût réduit.
- Absence du système bague balais.
- Source en courant alternatif.

**Les inconvénients :**

- Non découplage naturel.
- Non linéarités.
- Zone de stabilité étroite.
- Peu précis.
- Rendement moins élevé.

**II-3-16-Domaine d'application**

- Entraînement industrielle.
  - Industrie textile.
  - Industrie chimique.
  - Industrie papeterie.
  - Cimenterie (broyeurs).
  - Compresseurs.
  - Ventilateurs.
  - Pompes.
- Les convoyeurs.
- Les Palans (monte-charge).
- Chariots élévateurs.
- Ascenseurs. [12]

**II-4-Conclusion**

les moteurs asynchrones triphasés sont très employés dans l'industrie pour les différents avantages qu'ils présentent .le moteur asynchrone triphasé de faible et de moyenne puissance est utilisé dans les ventilateurs et les pompes hydrauliques, ainsi que dans les mélangeurs et les centrifugeuses, le moteur de grande puissance est utilisé dans les machines-outils, les appareils de levage et les compresseurs.

## Chapitre III : Généralités sur les fours rotatifs

### III-1 Introduction

Les fours tournants (rotatifs) sont très utilisés dans l'industrie du ciment, comme outils de production de clinker. Ils possèdent plusieurs avantages sur d'autres types des fours comme les lits fixes ; notamment le fait d'être des fours continus et le fait que les débits de production peuvent être élevés. Un procédé de combustion est nécessaire pour transformer le combustible chimique en chaleur capable de cuire le clinker.

Dans la première partie de ce chapitre nous allons faire la présentation de four rotatif de cimenterie et mécanique général et la maintenance, au fine matériel automatisme et système d'archivage.

### III-2 Présentation des fours rotatifs de cimenterie

D'un point de vue conception, il existe des invariants quelle que soit la dimension du four. Le four est un tube en appui sur des stations de roulement (deux, trois, ...huit) ayant une inclinaison de l'ordre de 4 % par rapport à l'horizontale, imprimé par une translation axiale assurée par une butée mobile entraînée par un poussoir hydraulique. Le four tourne à des vitesses de rotation comprises entre 1.8 et 2.2 tr/min, sa mise en rotation du four peut être assurée de deux façons :

- Sur le four à trois appuis et plus, elle est effectuée par un ou deux groupes de commande ; 1 ou 2 pignons une couronne dentée fixée sur la virole. Ceux de l'ECDE sont portés sur quatre station avec un seul groupe de commande, chacun.
- Avec la nouvelle technologie du four sur deux appuis, la rotation du four peut être obtenue directement par un ou deux galets d'une station de roulement eux-mêmes entraînés par deux ou quatre moteurs électrohydraulique ou électromécaniques.

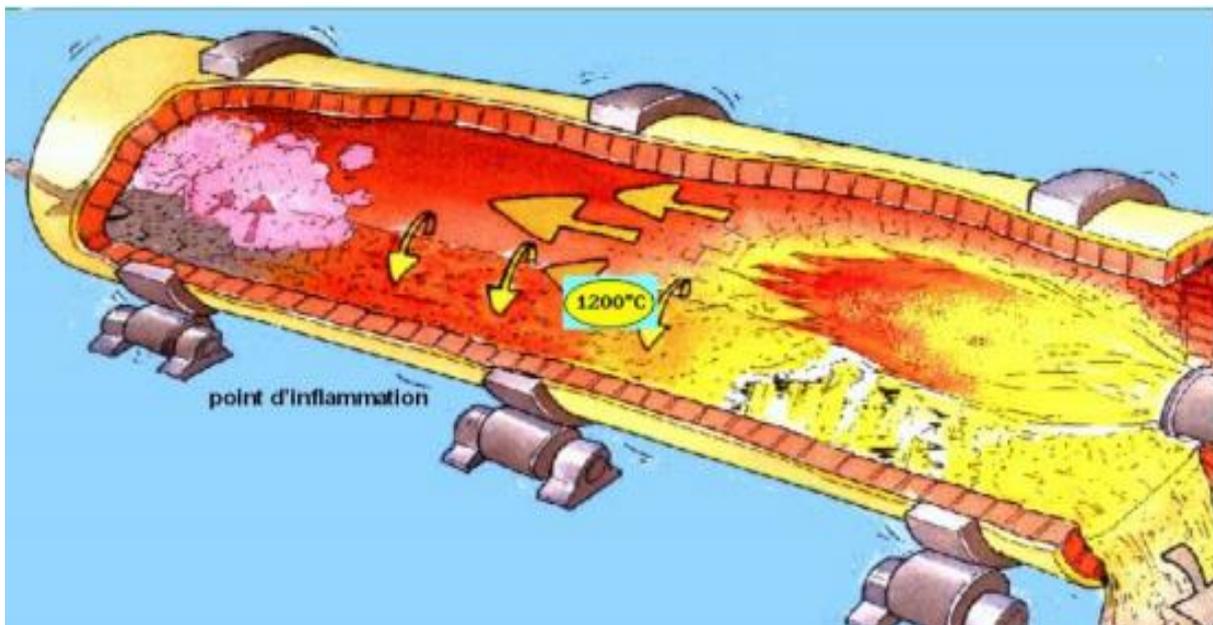


**Figure(III.1) :** Four rotatif.

A l'intérieur du four à clinker, la température des fumées évolue de 2000 – 2350 °C à 1050 °C tandis que la matière passe de 850 – 900 °C à 1450 °C, figure. Un revêtement réfractaire, principalement du type briquetage, protège la virole et réduit les pertes de chaleur.

Les fonctions principales du four rotatif sont :

- Obtenir la décarbonatation finale de la farine chaude.
- Cuisson de la matière.
- Assurer la bonne combustion du charbon.
- Permettre le transfert thermique (gaz solide).
- Transporter la matière.



**Figure(III.2)** : A l'intérieur du four à clinker

Le four est soumis à des sollicitations ayant pour origine les charges mécaniques mises en œuvre ou appliquées, la charge thermique où des défauts de géométrie.

### III-2-1 Les charges mécaniques mises en œuvre ou appliquées [13]

- Uniformément réparties : poids de la virole, poids du réfractaire, poids de la matière.
- Concentrées : poids de la couronne (bandage), poids sur les extrémités du four (joints, satellites), force et couple d'entraînement.
- Evolutives: croûtage, anneaux, concrétions.

### III-2-2 On peut citer comme défauts de géométrie

- Les alignements imparfaits des supports (station de galets, bandages) horizontal et vertical.
- La construction défectueuse au montage (axe de virole non rectiligne).
- Les déformations permanentes créées par des surchauffes.

### III-2-3 Les sollicitations dues à la charge thermique

La variation de température sur la longueur du four. Une distribution de température non homogène dans une section transversale. Ces sollicitations engendrent des contraintes et des déformations qui sont évaluées par le calcul lors de la conception, de manière à rester des limites acceptables.

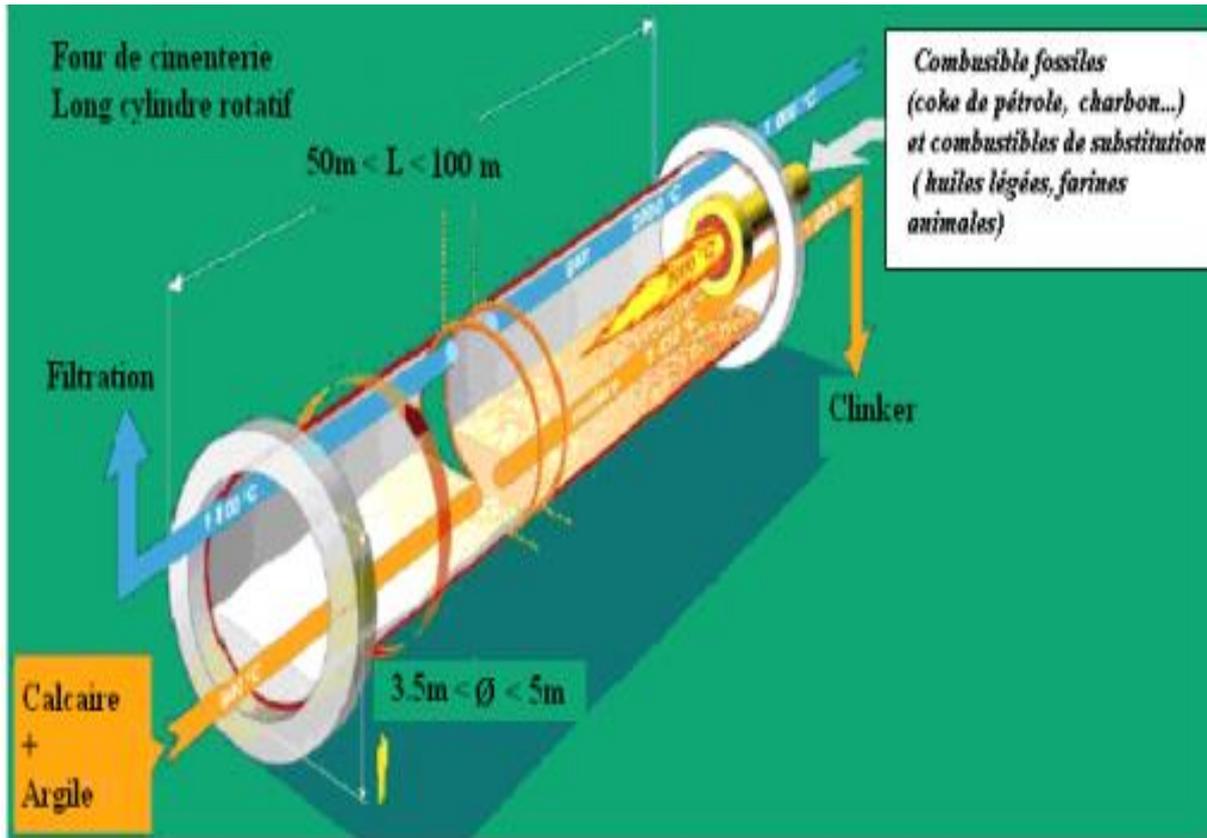
Elle fait l'objet d'un suivi et d'un contrôle quotidien et rigoureux en cas d'instabilité (vibration) vu les détériorations qu'elles peuvent engendrer.

### III-2 Le brûleur

L'énergie représente 30 à 40% du prix de revient du ciment. Un système qui permet une utilisation efficace de plusieurs types de combustibles donne un résultat encourageant. Une utilisation efficace (maîtrise) des brûleurs demande que le combustible ne précarise pas la qualité du clinker, non polluant et ne crée pas des problèmes de fonctionnement dans le four, mis à part le type de combustible utilisé.

Il existe plusieurs types de brûleurs, selon que la combustion est de type pré mélangé ou non pré mélangé.

Le brûleur dans un four rotatif fonctionne comme un injecteur, figure(III.3). L'air secondaire est aspiré du refroidisseur dans le four de telle façon que la flamme dégagée se concentre autour de ligne centre du four.



Figure(III.3) : Emplacement d'un brûleur dans un four de cimenterie

### III-3 Mécanique du four

#### III-3-1 Généralités

L'entraînement des fours s'effectue le plus souvent par l'intermédiaire d'un couple pignon-couronne dentée.

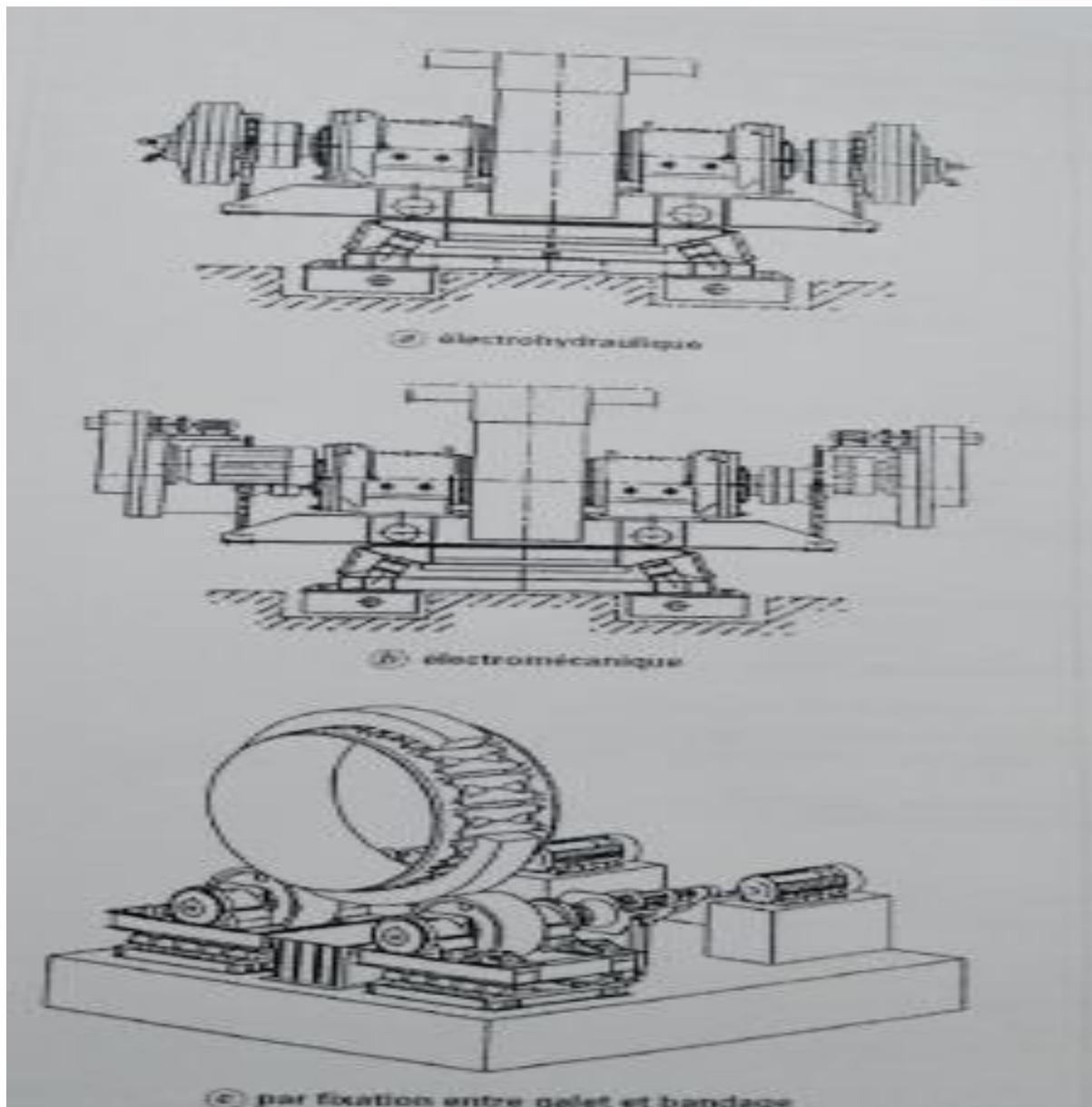
La couronne dentée est réalisée en deux pièces reliées à la virole soit par des bretelles tangentielles, soit par des lames « flexibles » fixées sur des sabots.

La commande du four est disposée dans la partie supérieure de manière à la protéger le plus possible de la chaleur ambiante.

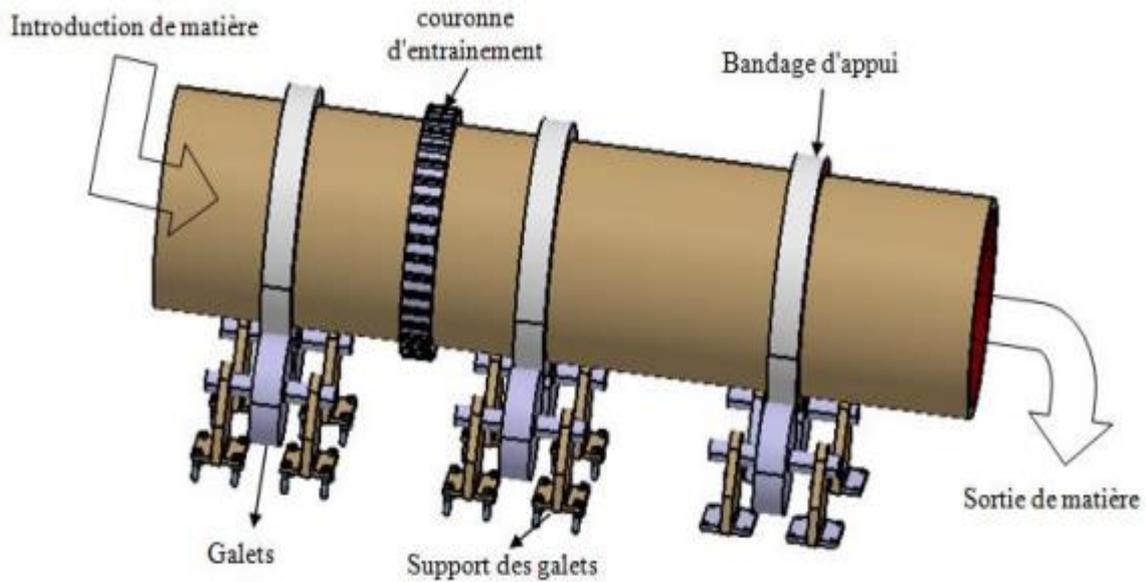
Pour réduire les risques de déformation qui ne manqueraient pas de se produire, sur arrêt brutal par manque de courant, on prévoit, en général, un groupe de virage de secours (pour mise en rotation à vitesse très réduite par un entraînement auxiliaire) alimenté par une source d'énergie électrique indépendante (groupe électrogène diesel). Le dispositif de virage est également utile lors des opérations de maintenance.

Le moteur d'entraînement est, dans la plupart des cas, un moteur électrique à vitesse variable. Il est possible d'installer une commande hydraulique, mais les expériences sont encore relativement peu nombreuses et récentes ; elles ne permettent pas d'affirmer que les deux inconvénients présentés par ce type de commande ont été supprimés, à savoir :

- un rendement global de 75-80 au lieu de 85-90.
- une durée de vie plus faible pour les moteurs hydrauliques.



**Figure(III.4)** : Commande directe des fours (polysuis).



**Figure(III.5) :** Le four rotatif de cimenteries.

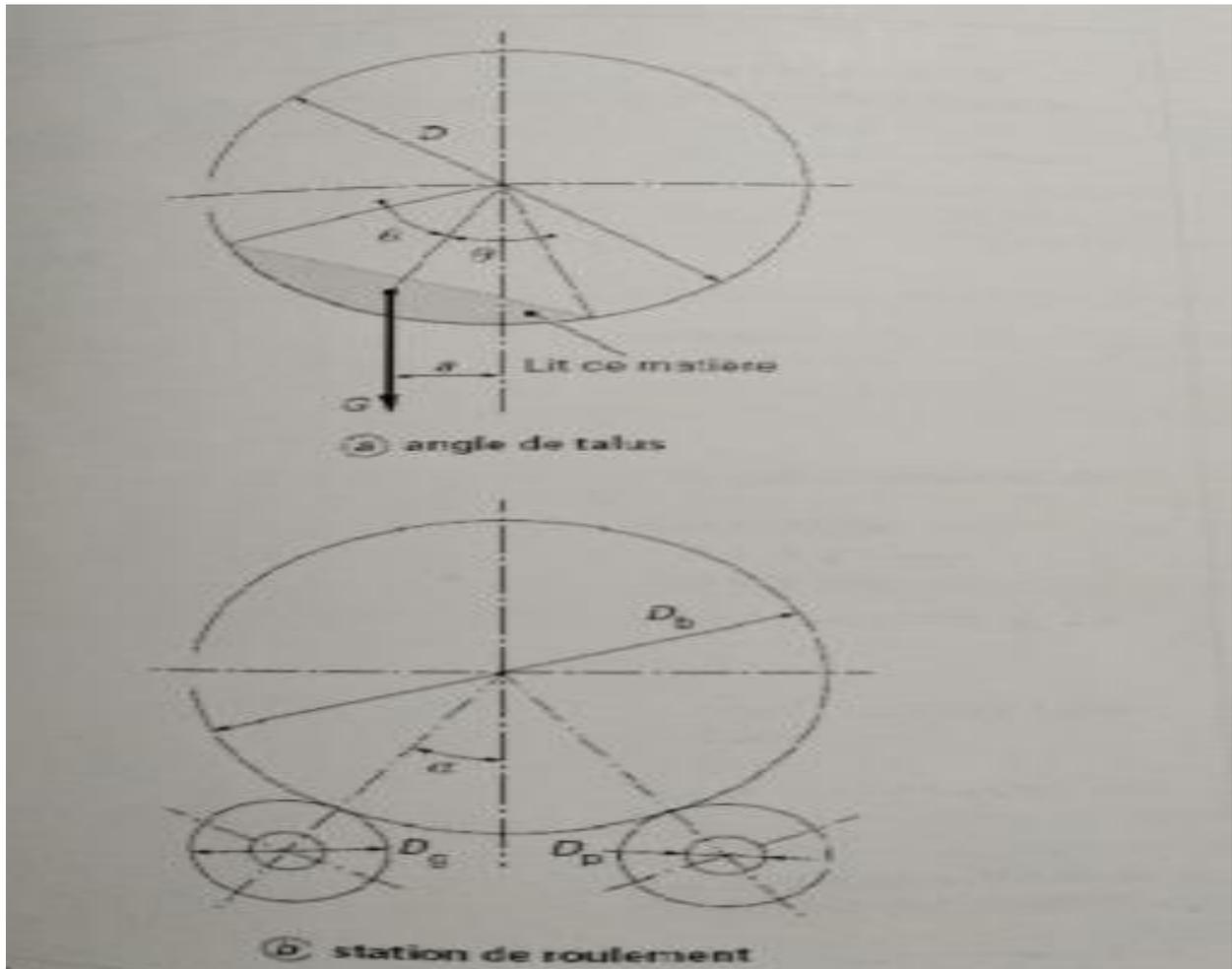
### III-3-2 Entraînement direct

La nouvelle technologie du four à deux appuis autorise l'utilisation de l'entraînement direct par un ou deux galets commandés électro hydrauliquement figure(III.4a) ou électro mécaniquement figure(III.4b) en alternative à l'entraînement par pignon et couronne. Cette technique fait l'objet d'applications industrielles depuis 1995.

La commande directe par les galets impose l'utilisation de bandage cranté à fixation élastique pour transmettre le couple à la virole du four figure(III.4c).



**Figure(III.6) :** Tronçon virole.



Figure(III.7) : Angle de talus



Figure(III.8) : les bandages

### III-3-3 Calcul de la puissance

La puissance  $P$  absorbée par le four est la somme des puissances nécessaires pour vaincre les différents éléments résistants :

- la charge à mettre en mouvement ( $P_1$ ).
- les forces de frottement entre galets et palier ( $P_2$ ).
- les forces liées au contact entre galets et bandages ( $P_3$ ).

On a donc :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (\text{III-1})$$

Une approche théorique permet d'évaluer ces puissances, avec les formoles suivant :

- En générale,  $P_1$  représente 85% de la puissance totale. On a :

$$P_1 = 86.4(D \sin \theta)^3 Lnc \quad (\text{III-2})$$

Avec :

$\theta$  :  $\frac{1}{2}$  angle de talus de matière vu du centre du four défini sur la figure(III.6a).

$n$  : (tr/min) vitesse de rotation.

$c$  : coefficient dont la valeur est fonction de l'angle de talus naturel.

- $c = 0.76 * 10^{-3}$  Pour un angle de talus naturel de  $35^\circ$  (four a ciment).
- $c = 0.92 * 10^{-3}$  Pour un angle de talus naturel de  $40^\circ$ .
- $c = 1.8 * 10^{-3}$  Pour les fours avec dispositif intérieur de relevage de la matière.

- Les puissances  $P_1$  et  $P_2$  sont la somme des puissances partielles calculées pour chaque appui.

$$P_2 = 0.58 * 10^{-4} \frac{Q_f}{\cos \alpha} \frac{D_b * D_p}{D_g} n f \quad (\text{III-3})$$

$$P_3 = 5.7 * 10^{-8} \frac{Q_f}{\cos \alpha} \frac{D_b * D_g}{D_g} n \quad (\text{III-4})$$

Avec :

$Q_f$  : Poids du four rotatif pour chaque appui.

$\alpha$  : défini figure(III.6b) (en générale 30°).

$D_b$  (m) : diamètre du bandage.

$D_g$  (m) : diamètre du galet.

$D_p$  (m) : diamètre du palier.

$f$  : coefficient de frottement dont la valeur dépend du type de palier.

- $f=0.02$  pour un palier lubrifié à l'huile.
- $f=0.06$  pour un palier lubrifié à la graisse.
- $f=0.01$  pour un palier à roulement à billes.

➤ une formule simplifiée pour la puissance absorbée a été proposée :

$$P = 16.7 * 10^{-2} D^2 L \quad (\text{III-5})$$

Compte tenu des aléas de production qui peuvent conduire à des puissances absorbées anormalement élevées dues :

- soit à la formation de collages et d'anneaux.

- soit à la destruction partielle des anneaux et à la formation de balourds.

-soit aux déformations en vilebrequin de la virole.

Il est d'usage courant de prendre des coefficients de sécurité de 2 à 2,5 par rapport aux résultats des calculs effectués pour la détermination de la puissance à installer.

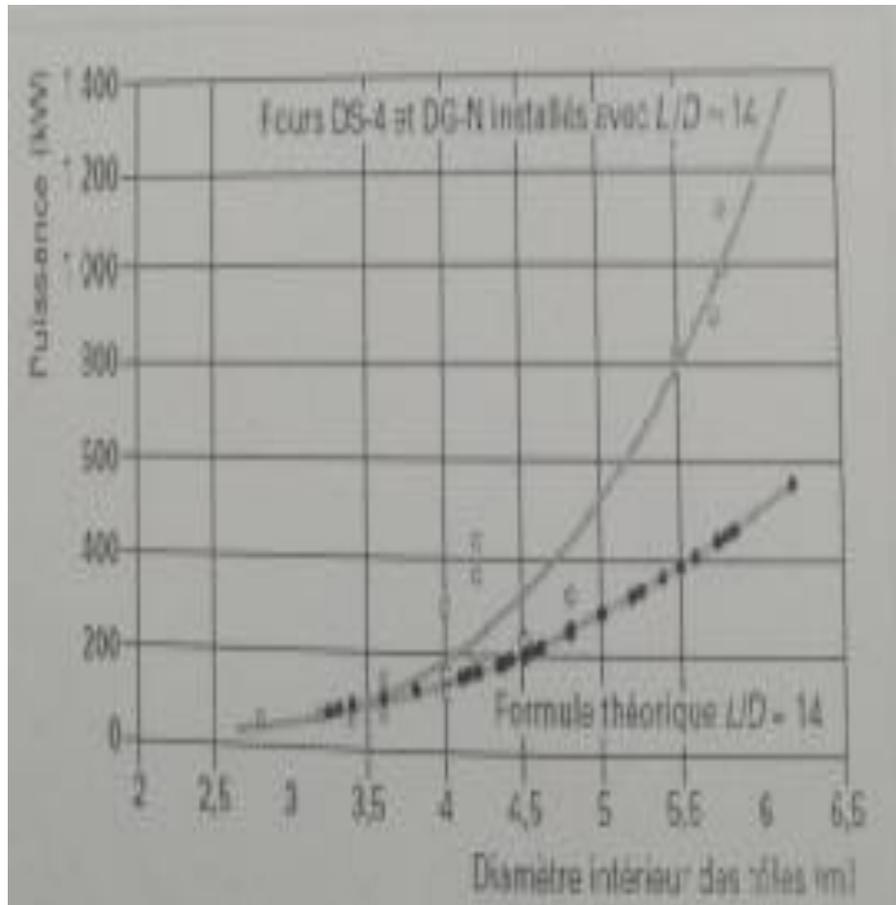
Nota : Il s'agit de puissance réellement installés, différente de la puissance à installer, La puissance réellement installée intègre la notion de standardisation des puissances moteur au sein d'une usine ou d'une société.

Exemple :

Four deux appuis..... $D=4.3$  m :  $L=55$  m ... $P=400$ KW

Four trois appuis ..... $D=5.5$  m :  $L=80$  m ... $P=800$  KW

Figure(III.9) indique la puissance théorique du four pour un rapport  $L/D=14$ , calculée en application de la formule simplifiée précédente, ainsi que la tendance observée sur des fours DS4 et DGN de rapport  $L/D$  voisin de 14. Ce graphique confirme l'usage d'un coefficient de sécurité de l'ordre de 2,5. [14]



**Figure(III.9)** : Puissance pour un four en fonction du diamètre.

### III-3-4 Maintenance

La durée de vie des éléments importants du four est calculée en années, sur une base de 300 jours de marche par an, 24 h/24, soit 7 200 h.

- ❖ **Les bandages** : peuvent subir des casses et fissures entre 0 et 15 ans de service (8% des cas). Au-delà de 15 ans, une dégradation par écaillage apparaît dans 5 % des cas tandis que la risque de casse u fissure est réduit à 2 %.

Globalement 85 % des bandages ont une durée de vie de 25 ans.

- ❖ **Los virolos** : courantes ont des durées de vie de l'ordre de 20 à 30 ans ; mais des phénomènes de corrosion de la virole, liés à l'usage de matières premières ou combustibles particuliers, peuvent apparaître et conduire en quelques années à des remplacements de tronçons de virole.

De memo, une conduite de four, sans ménagement, engendre des déformations permanentes irréversibles que l'on peut assimiler à des accidents. Ces déformations ne seront supprimées que par remplacement des viroles.

En outre, la virole de sortie de four est très sollicitée et peut être quelquefois remplacée dans 3 à 5 ans.

### III-4 système d'archivage

#### III-4-1 Matériel de l'automatisme utilisé



**Figure(III.10)** : Automate programmable industriel (API) S7-400.

Le s7-400 est le plus puissant API de la gamme de contrôleurs SIMATIC.

Il permet de réaliser des solutions d'automatisation performantes avec totally Integrated Automation (TIA)

Le s7-400 est une plateforme d'automatisation pour des solutions système dans le génie des procédés, qui se distingue avant tout par sa modularité et ses réserves de puissance.

S7-400 LE super automate pour les tâches de catégorie supérieure et moyenne

La solution pour les applications les plus pointues CPU de puissance échelonnée et une gamme étoffée de modules pour l'adaptation optimale à l'application d'automatisation Grande souplesse d'emploi grâce à la simplicité de réalisation d'architectures décentralisées connectique conviviale Des possibilités de communication et de mise en réseau optimales facilité de mise en œuvre procurée par la confort de manipulation et une constitution simple sans ventilateur Evolutivité permettant de suivre la croissance des installations.

### **A-Multitraitement**

Exploitation simultanée de plusieurs CPU dans un châssis de base S7-400.

La configuration multiprocesseur permet de diviser la puissance globale de l'API S7-400.

Il est ainsi possible de fractionner des tâches complexes par spécialité-commande, calcul ou communication – et les affecter à différentes CPU. Chaque CPU peut se voir affecter sa propre périphérie locale.

### **B-Modularité**

Le bus de fond de panier performant du S7-400 et les interfaces de communication enfichables directement sur la CPU permettent une exploitation performante de nombreuses lignes de communication.

Ceci permet par exemple de scinder la communication en une ligne dédiée aux fonctions IHM et de programmation, une autre aux application de Motion Control exigeantes en performances et synchronisme et une autre réservée au bus terrain E/S performances et synchronisme et une autre réservée au bus terrain E/S performances et synchronisme et une autre réservée au bus terrain E/S "normal".

Des connexions supplémentaires à des systèmes MES/ERP ou à Internet sont également réalisables.

Ingénierie et diagnostic : En particulier pour les solutions d'automatisation complexes avec une part importante d'ingénierie.

Le s7-400 peut être configuré et programmé de façon très efficace avec les outils d'ingénieries SIMATIC.

Des langages évolués tels que SCL et des outils d'ingénierie graphique pour les commandes séquentielles, les graphes d'état et les diagrammes technologiques sont disponibles à cet effet.

### **III-4-2 Définition de PCS7**

PCS 7 est un système de conduite de processus grâce à de nombreuses fonctions automatiques. On peut créer facilement un projet. Il vous familiarise par certaines fonctions et vous offre de nombreuses possibilités pour créer des solutions individuelles et spécifiques au projet, adapté à vos besoins. [15]

Un projet ou multi projet PCS 7 est constitué des objets suivants :

- Configuration matérielle.
- Blocs (organisation).
- Diagrammes CFC et SFC.

### **III-4-3 Système d'archivage WIN CC**

#### **III-4-3-1 Définition**

SIMATIC Win CC est un système de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) ainsi qu'une interface homme-machine développés par Siemens. Les SCADA sont particulièrement utilisés dans la surveillance des processus industriels et des infrastructures. SIMATIC Win CC peut être utilisé avec Siemens PCS7 et Teleperm. Win CC est conçu pour fonctionner sur des systèmes Windows. Il utilise Microsoft SQL Server pour gérer les connexions.

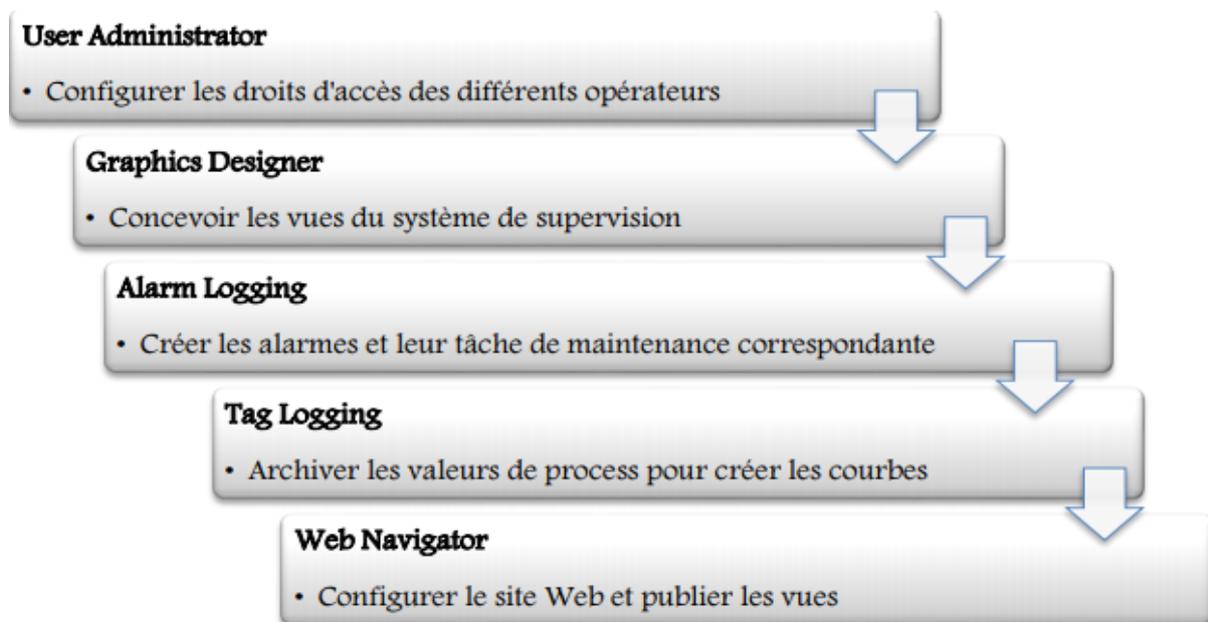
Il est également accompagné de VBScript et d'applications d'interface en langage C.

Win CC a été l'un des premiers systèmes à être la cible de virus, notamment celui de Stuxnet4.

### III-4-3-2 Présentation du logiciel de supervision Win CC

Lorsque la complexité du processus augmente et que les machines et installations doivent répondre à des spécifications de fonctionnalité toujours plus sévères, l'opérateur a besoin d'un maximum de transparence.

Cette dernière s'obtient au moyen de l'interface HMI qui signifie humain machine interface. Win CC est un système HMI Performant utilisé sous Microsoft Windows, il constitue l'interface entre l'homme (opérateur) et la machine (installation/processus). Le contrôle proprement dit du processus est assuré par les automates programmables industriels, il établit par conséquent une communication entre Win CC et l'opérateur d'une part et entre Win CC et l'automate. [16]



Figure(III.11) : Etapes de création du système de supervision Win CC

#### III-4-3-2-1 Création des courbes

En Runtime, les valeurs de processus à archiver sont acquises, traitées puis enregistrées dans la base de données d'archive. Nous pouvons les sortir sous forme de tableau ou de courbe graphique.

Il existe de plus la possibilité d'imprimer ces valeurs sous forme de journal. L'archivage des valeurs du processus et celles agrégées est effectué par l'outil Tag Logging.

Il permet de définir les cycles d'acquisition et d'archivage.

Nous avons utilisé l'archivage des valeurs du processus dans notre système pour des tâches essentielles, comme :

- Détection précoce des états de perturbation et de danger ou de dysfonctionnements.
- Archivage des valeurs de processus pour les boucles de régulation et de synchronisation entre les différents paramètres ainsi que pour le contrôle de la finesse du produit.
- Historique de ces valeurs afin de gagner du temps pour le diagnostic et l'optimisation des cycles de maintenance.
- Avoir une documentation de processus pour l'utiliser par des experts distants en cas de besoin.
- Facilité de construction de rapports et leur envoi aux responsables via Internet.

Figure(III.12) présente l'archivage des valeurs de processus pour la création des courbes d'analyse pour ces valeurs [18].

Nom d'archive	Type d'archive	Dernière modification
Courbes	Archive de valeurs de process	2011-11-25 17:40:21
FuzzyControl	Archive de valeurs de process	2011-10-24 20:45:09
PID	Archive de valeurs de process	2011-11-23 00:16:27

..	Nom de variable	Variable de process	Type de variable	Comment	Dernière modif	Mode d'acquisitio	Assignment des va	Archivage	Egal	Cycle c
▶	ProgrammeSS7(1)/P1L01D1	ProgrammeSS7(1)/P1L01D1	analogique		2011-12-09 22:33:20	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/P1L01L21	ProgrammeSS7(1)/P1L01L21	analogique		2011-12-09 22:34:07	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/P1L02D1	ProgrammeSS7(1)/P1L02D1	analogique		2011-12-09 22:34:57	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/P1L02L21	ProgrammeSS7(1)/P1L02L21	analogique		2011-12-09 22:35:33	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/Z1M01P1	ProgrammeSS7(1)/Z1M01P1	analogique		2011-12-09 22:37:46	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/Z1M01P2	ProgrammeSS7(1)/Z1M01P2	analogique		2011-12-09 22:38:10	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/Z1M01T3	ProgrammeSS7(1)/Z1M01T3	analogique		2011-11-25 17:41:33	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/Z1M01T8	ProgrammeSS7(1)/Z1M01T8	analogique		2011-12-09 22:39:20	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/Z1M01T9	ProgrammeSS7(1)/Z1M01T9	analogique		2011-12-09 22:40:00	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/Z1M03I1	ProgrammeSS7(1)/Z1M03I1	analogique		2011-12-09 22:40:30	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/Z1M03T8	ProgrammeSS7(1)/Z1M03T8	analogique		2011-11-25 17:42:23	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/Z1M03T9	ProgrammeSS7(1)/Z1M03T9	analogique		2011-11-25 17:42:39	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms
	ProgrammeSS7(1)/Z1S01S1	ProgrammeSS7(1)/Z1S01S1	analogique		2011-11-25 17:41:11	Cyclique-continu	Système	activée		500 ms

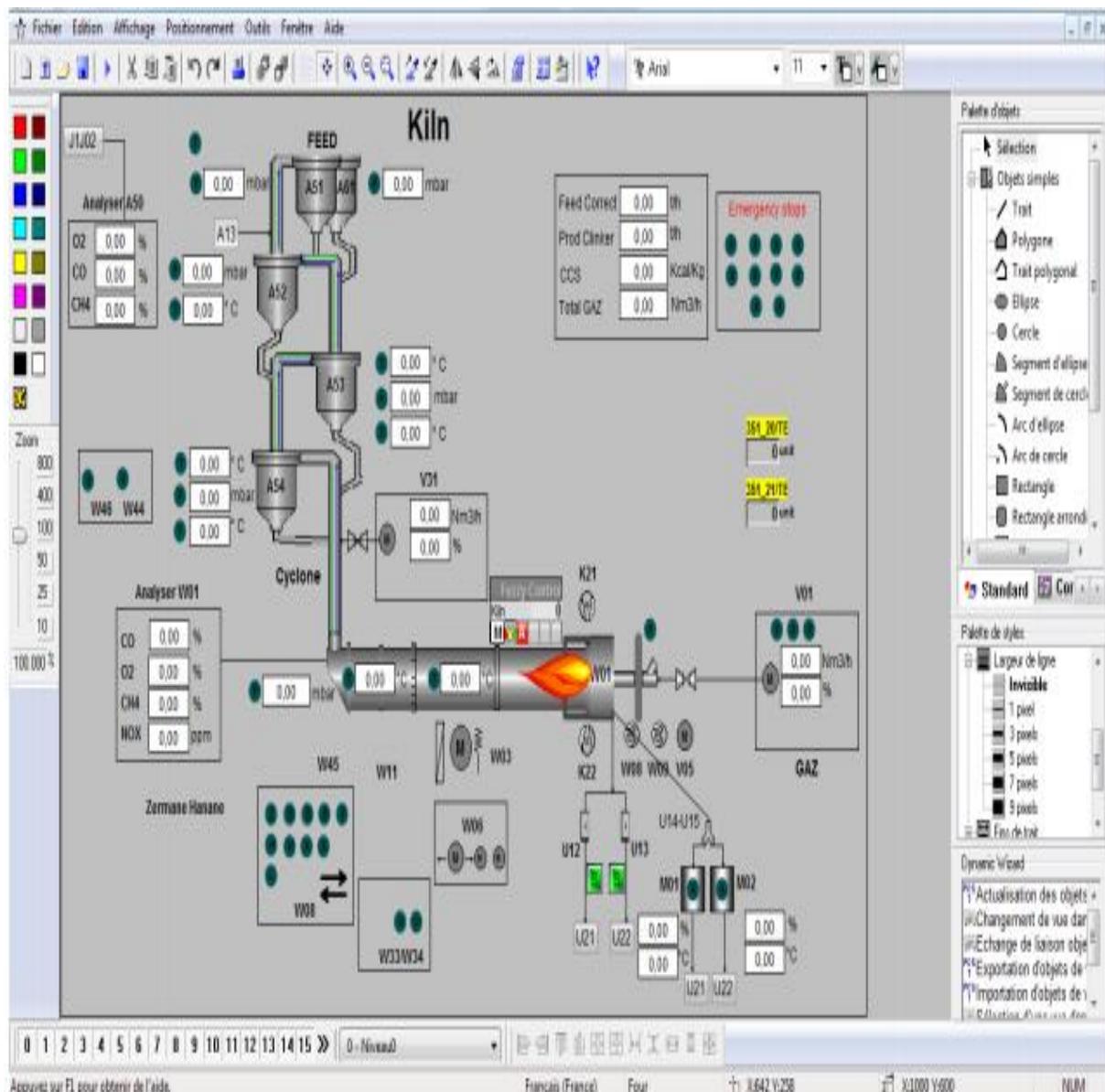
Figure(III.12) : Archivage des valeurs d'analyse utilisant Tag Logging.

### III-4-3-2-2 Description de Win CC

Win CC est composé de deux parties

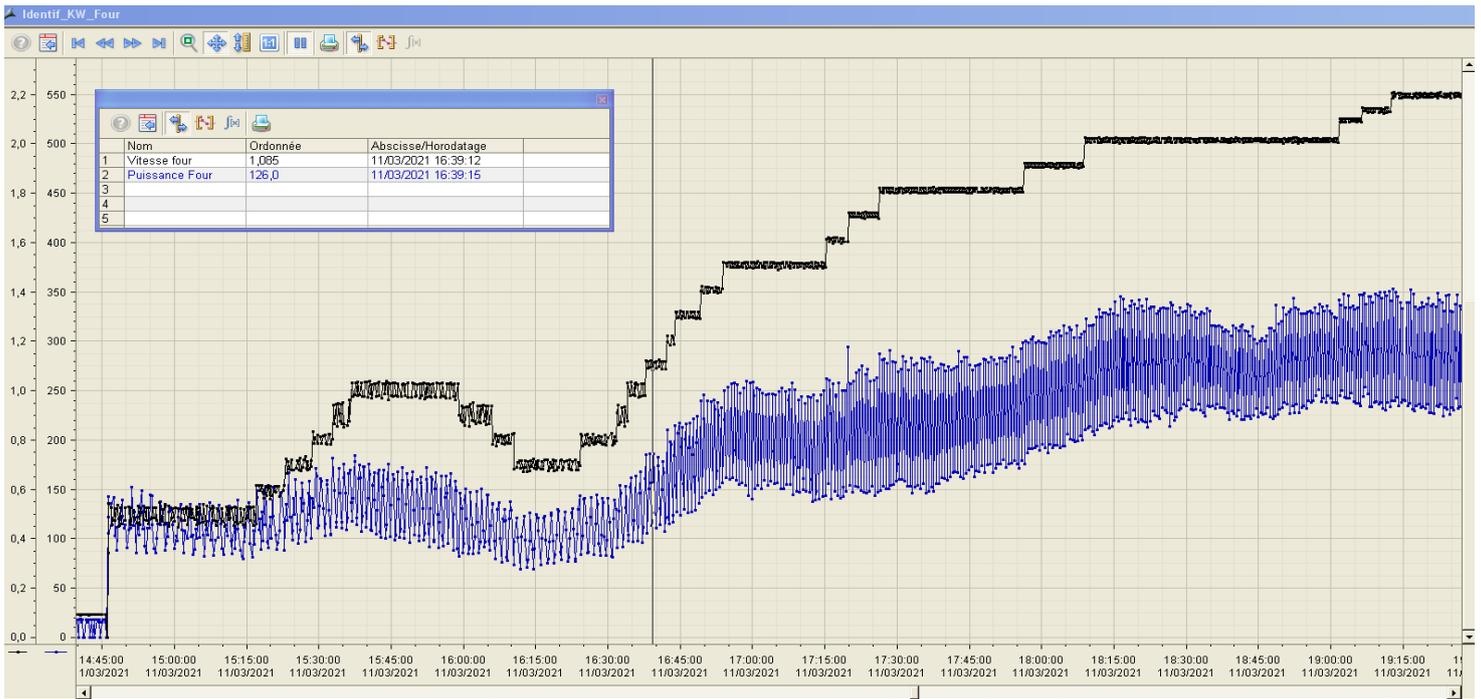
**Partie 1 :** Contient toutes les applications de Win CC où nous trouvons tous les éditeurs utilisables pour configurer OS.

**Partie 2 :** Présent la fenêtre de détail qui affiche des informations détaillées de l'application de Win CC que nous avons sélectionné. Nous utilisons uniquement l'éditeur Graphics Designer, pour créer la vue processus de notre projet. [17]

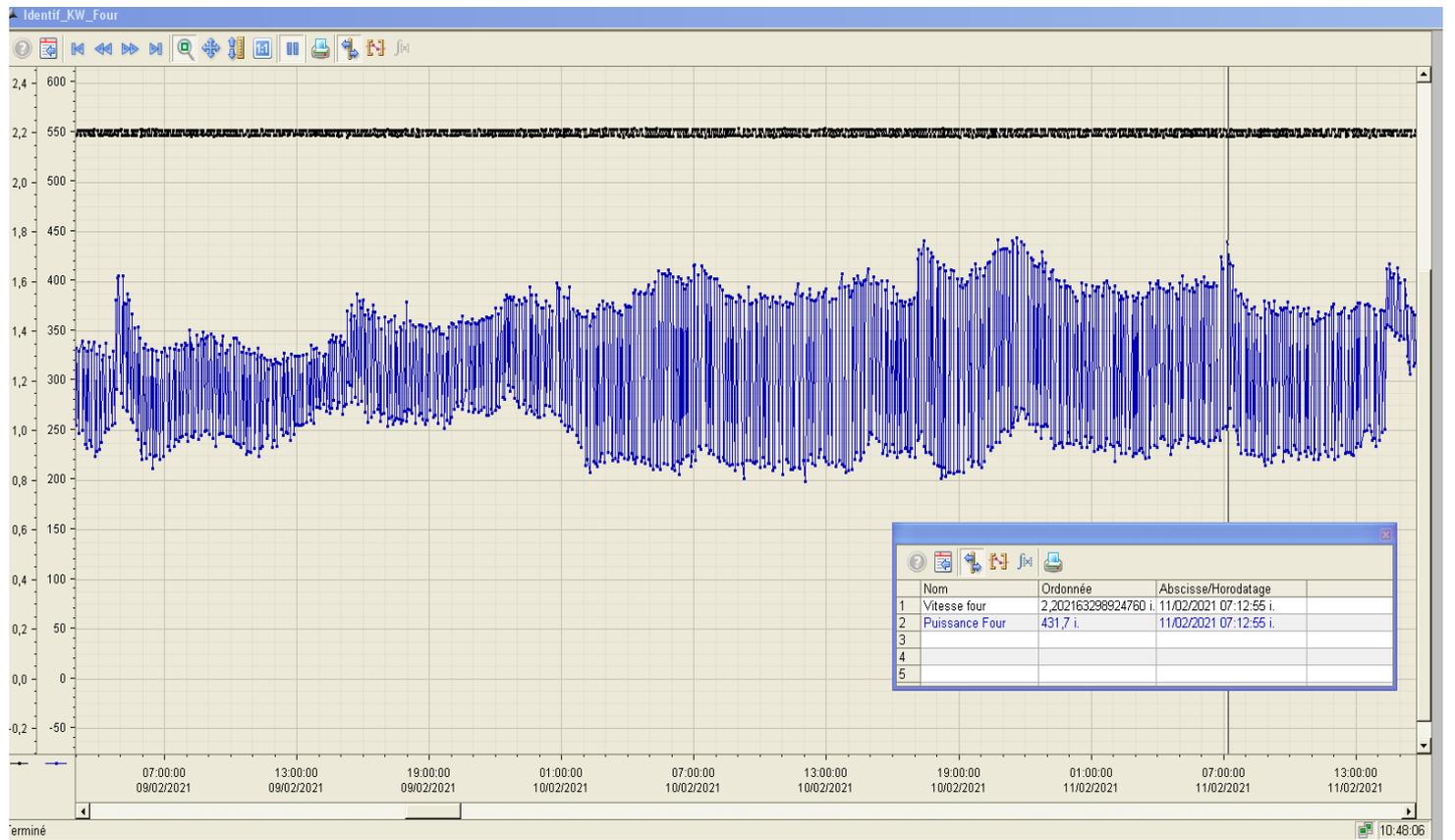


Figure(III.13) : Création des vues en utilisant Graphics Designer.

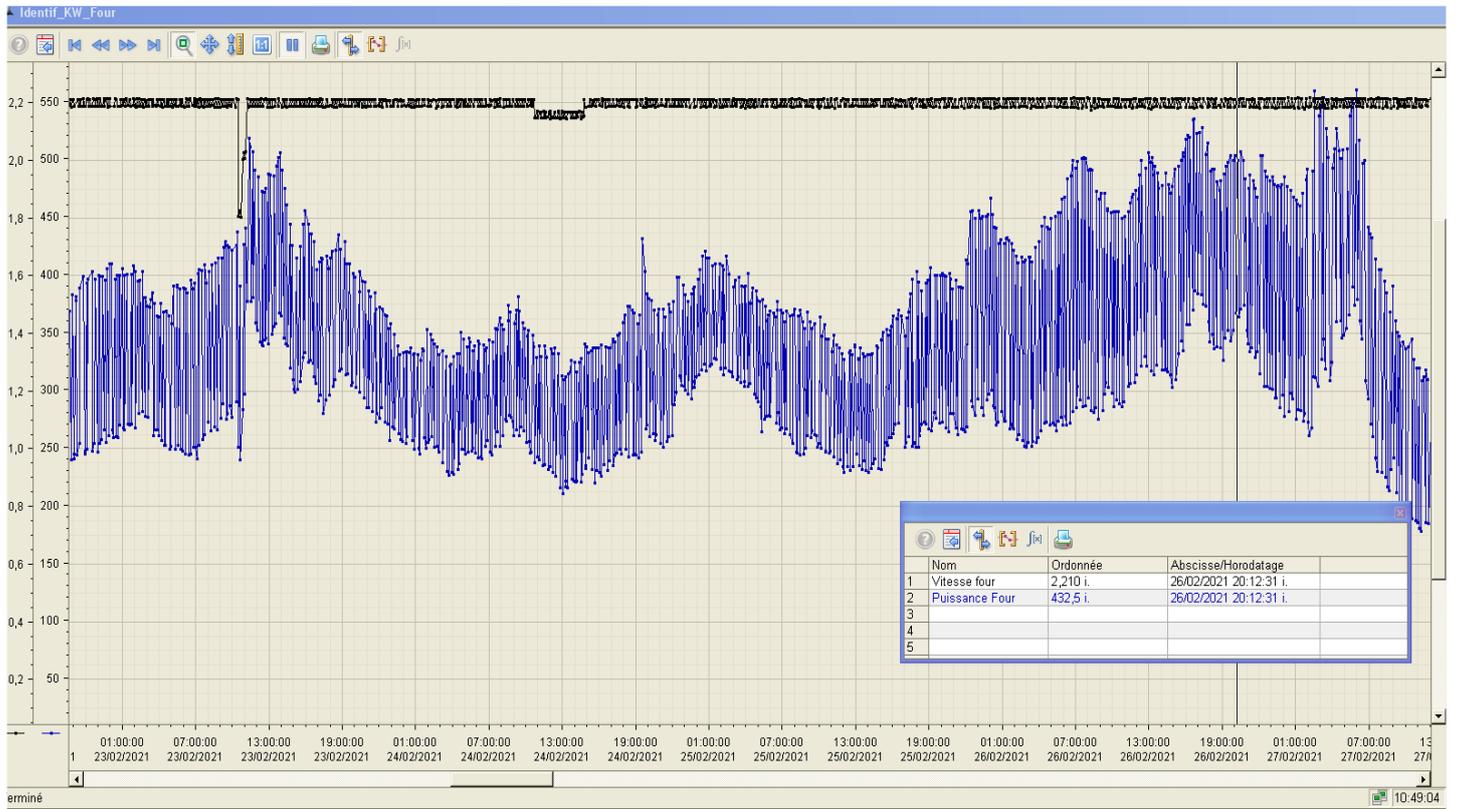
Des Exemples des courbes affichées par le système Win CC :



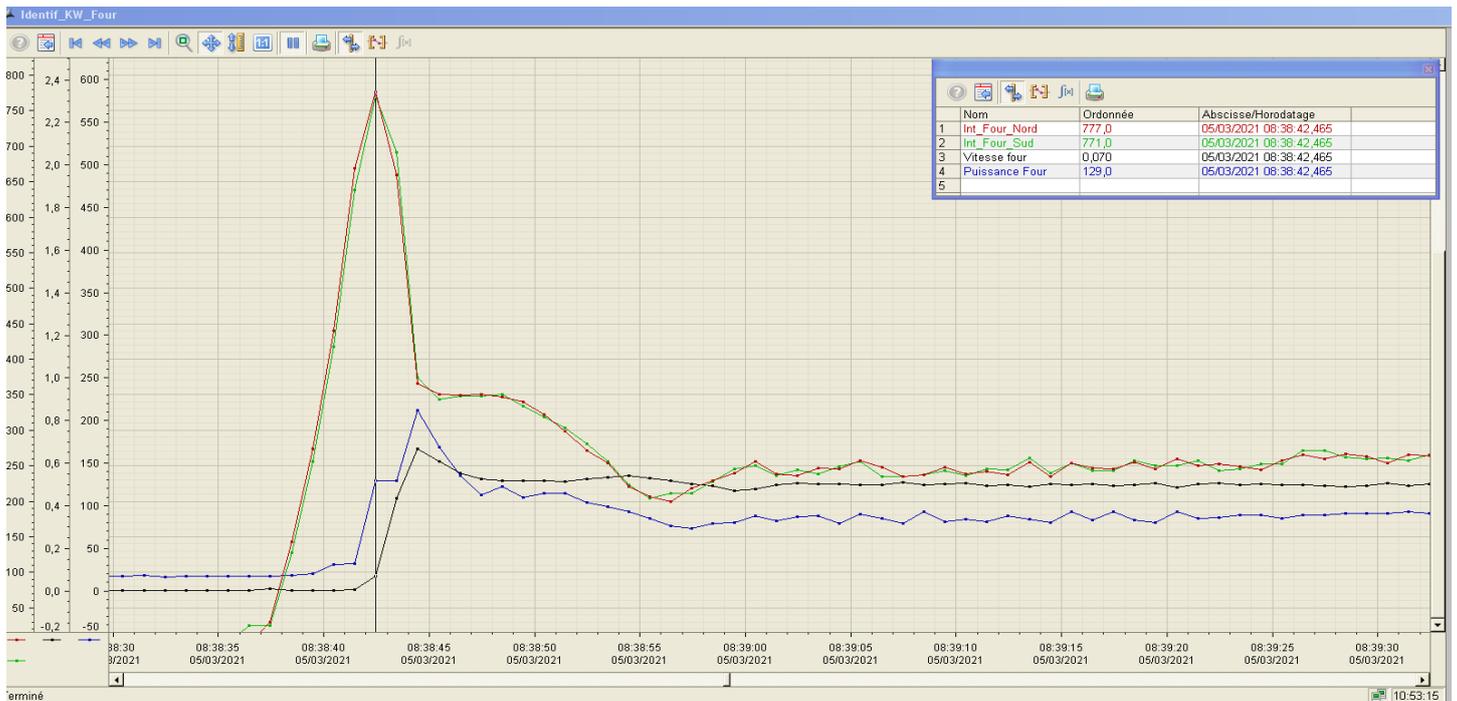
Figure(III.14) : Puissance en fonction de la vitesse four.



Figure(III.15) : Exemple de la courbe de la puissance four en marche normale.



Figure(III.16) : Un exemple de la courbe de la puissance dans le cas d'une perturbation extrême de la charge.



Figure(III.17) : Exemple de les courbes de la puissance four et les courants et les tensions.



**Figure(III.18)** : La puissance de four in fonction de vitesse de rotation.

D'après la Figure(III.18) qui représente la puissance de four in fonction de vitesse de rotation, nous remarquons que l'augmentation de la vitesse de rotation résulte une augmentation de puissance de four. Ceci dans le but d'avoir la puissance du moteur de avec laquelle on va démarrer notre étude dans le chapitre qui suit.

### III-5 Conclusion

Dans cette partie de travail, le système automatique été utiliser pour déterminer la puissance de moteur du four.

Les résultats obtenus indiquent que l'augmentation de la vitesse de rotation résulte une augmentation de puissance de four jusqu'à certain valeur maximale de vitesse de rotation 2.2 tr /min et une puissance du moteur de four 350 KW.

Dans le futur proche nous voulons augmenter cette vitesse de rotation jusqu'à 3 tr/min pour obtenir une puissance de 400 KW.



**Chapitre IV : Adaptation d'une nouvelle  
commande numérique des moteurs  
asynchrones des fours rotatifs**

## IV-1 Introduction

En basse tension, la plage de tension s'étend de 0 à 1000 V en courant alternatif et de 0 à 500 V en courant continu. Une des premières décisions à prendre est le choix entre la distribution en courant alternatif qui correspond au type le plus commun de courant à travers le monde, et le courant continu. Ensuite, les concepteurs doivent choisir la tension nominale la plus appropriée dans ces gammes de tensions. Lorsque l'installation est connectée à un réseau public BT, le type de courant et la tension nominale sont déjà sélectionnés et imposés par le distributeur. La conformité à la réglementation nationale est alors la deuxième priorité des concepteurs de l'installation électrique. La réglementation peut être fondée sur des normes nationales ou internationales telles que la série CEI 60364.

La conformité des équipements utilisés dans l'installation aux normes de produits appropriées est également d'une importance primordiale pour le niveau de sécurité et de qualité. Les conditions environnementales seront de plus en plus strictes et devront être prises en considération au stade de la conception de l'installation.

Cela peut inclure des réglementations nationales ou régionales prenant en compte les matériaux utilisés dans l'équipement ainsi que le démantèlement de l'installation en fin de vie.

## IV-2 Domaines réglementaires et normatifs

Le module est porté sur le dimensionnement d'une installation en BT (Basse Tension), ce qui implique que la plage de tension est comprise entre : 0 et 1000 V.

Pour rappel, ci-dessous les domaines de tension :

Il existe deux types de texte régissant les règles à prendre en compte dans le dimensionnement d'une installation électrique en BT :

-Les textes réglementaires Une refonte totale de ces textes relatifs à la protection des travailleurs contre les chocs électriques, constituée de quatre décrets, a été effectuée. L'approche réglementaire est très différente de l'ancienne.

-Les textes normatifs. Pour le respect de ces objectifs. Cela simplifie le travail des concepteurs, réalisateurs et vérificateurs. Les règles fondamentales de protection restent inchangées et les installations conformes aux précédentes règles.

Les textes réglementaires relatifs aux locaux d'habitation ont été revus et ont maintenant la même approche que ceux relatifs à la protection des travailleurs.

### **IV-3 Caractéristiques des récepteurs**

Un examen de toutes les utilisations devant être alimentées en électricité doit être réalisé. Les extensions éventuelles ou les modifications réalisées au cours de la vie de l'installation électrique sont à considérer. Un tel examen vise à estimer le courant circulant dans chaque circuit de l'installation et les sources d'alimentation nécessaires.

Le courant total ou la puissance totale peuvent être calculés à partir des données relatives à la localisation et la puissance de chaque charge, ainsi que la connaissance des modes de fonctionnement (régime permanent, démarrage, fonctionnement non simultané, etc.).

L'estimation de la puissance maximale peut utiliser divers facteurs, selon le type d'utilisation : type d'équipement et type de circuits utilisés dans l'installation électrique.

A partir de ces données, la puissance requise pour la source d'alimentation et (le cas échéant) le nombre de sources nécessaires à une alimentation satisfaisante de l'installation est facilement obtenue. L'information locale sur les structures tarifaires est également nécessaire pour permettre le meilleur choix de raccordement au réseau d'alimentation, par exemple en moyenne ou basse tension.

### **IV-4 Branchement**

#### **• Basse Tension**

L'installation peut être raccordée au réseau local. Le comptage est (nécessairement) effectué en tarification basse tension.

La norme NF C 14-100 définit 2 types de branchement : branchement à puissance limitée (jusqu'à 36 kVA) et branchement à puissance surveillée (de 36 à 250 kVA).

#### **• Les principaux en BT sont**

NF C 15-100 / CEI 60364 (série) : Installations électriques à basse tension.

UTE C 18-510 : Recueil d'instructions de sécurité électrique pour les ouvrages.

NF C 15-105 : Détermination des sections de conducteurs et choix des dispositifs de protection

Code du travail.

		En courant alternatif	En courant continu lissé
Très basse Tension		$U_n \leq 50V$	$U_n \leq 120V$
Basse Tension Domaine BT <sup>+</sup>	BT	$50V < U_n \leq 1\ 000V$	$120V < U_n \leq 1500V$
Haute Tension Domaine HT	HTA	$1000V < U_n \leq 50\ 000V$	$1\ 500V < U_n \leq 75\ 000V$
	HTB	$U_n > 50\ 000V$	$U_n > 75\ 000V$

Tableau (IV-1) : Détermination des sections de conducteurs.

## IV-5 Architecture de distribution électrique

- Le réseau de distribution est alors étudié dans son ensemble.
- Un guide de sélection est proposé pour déterminer l'architecture la mieux adaptée.
- Tous les niveaux de la distribution générale MT/BT et de la distribution de puissance BT (La distribution BT) sont couverts.
- Le schéma des liaisons à la terre, ou régime de neutre, est choisi en fonction de la législation en vigueur, des contraintes liées à l'exploitation du réseau et à la nature des récepteurs.
- Les matériels de distribution, tableaux et canalisations, sont déterminés à partir du plan des bâtiments, de la localisation des récepteurs et de leur regroupement.
- La nature des locaux et de l'activité conditionne leur niveau de résistance aux influences externes.

## IV-6 Protection contre les chocs et incendies électriques

La protection contre les chocs électriques consiste à mettre en œuvre une protection de base (protection contre les contacts directs) et des dispositifs pour la protection en cas de défaut (protection contre les contacts indirects). Des dispositifs coordonnés fournissent une mesure de protection adéquate.

Une des mesures de protection les plus courantes consiste en une "déconnexion automatique de l'alimentation" lorsque la disposition de protection contre les défauts consiste à

la mise en œuvre d'un système de mise à la terre. Une profonde compréhension de chaque système normalisé (TT, TN et IT) est nécessaire pour une mise en œuvre correcte.

Les incendies électriques sont causés par les surcharges, les courts-circuits et les courants de fuite à la terre, mais aussi par des arcs électriques dans les câbles et connexions. Ces arcs électriques dangereux ne sont pas détectés par les dispositifs de courant résiduel ni par les disjoncteurs ou les fusibles. La technologie du détecteur d'arc rend possible la détection des arcs dangereux et ainsi assurer une protection supplémentaire des installations.

## **IV-7 Circuits et appareillage**

### **La protection des circuits**

L'étude détaillée des circuits est alors réalisée. La section des conducteurs des circuits est déterminée :

- à partir du courant nominal des charges, de la valeur du courant de court-circuit et du type de dispositif de protection.
- en prenant en compte le mode de pose et de son influence sur le courant admissible des conducteurs.

Avant de valider le choix de la section des conducteurs comme indiqué ci-dessus, les prescriptions suivantes doivent être satisfaites :

- la chute de tension dans les conducteurs est conforme aux normes en vigueur.
- le démarrage des moteurs s'effectue correctement.
- la protection contre les chocs électriques est assurée.

Le courant de court-circuit est alors déterminé et la vérification de la tenue thermique et électrodynamique des canalisations est à réaliser.

Ces différents calculs peuvent entraîner une révision des choix faits précédemment.

Les fonctions que doit remplir l'appareillage permettent de définir son type et ses caractéristiques (L'appareillage BT : fonctions et choix).

La filiation entre disjoncteurs et la sélectivité entre disjoncteurs et disjoncteurs/dispositifs de protection par fusibles sont analysées.

## **IV-8 La protection contre les surtensions**

Le coup de foudre direct ou indirect peut avoir des conséquences destructrices sur les installations électriques à plusieurs kilomètres du point d'impact. Les surtensions de manœuvres, les surtensions transitoires ou à fréquence industrielle peuvent aussi engendrer les mêmes conséquences. Les effets sont examinés et des solutions sont proposées.

## **IV-9 Les alimentations et récepteurs particuliers**

Dans ce chapitre sont étudiés des équipements ou des réseaux particuliers :

- Sources d'alimentation spécifiques telles qu'alternateurs ou alimentations statiques.
- Récepteurs ayant des caractéristiques spéciales tels que moteur asynchrone, circuit d'éclairage ou transformateur BT / BT.
- Réseaux spécifiques tels que réseau à courant continu.

## **IV-10 L'installation actuelle**

L'installation actuelle contient un transformateur à sec, qui alimente les deux variateurs de vitesse à courant continu (Maitre/Esclave) via des jeux de barres, ces derniers alimentent les deux moteurs (Maitres/Esclave) via des câbles de puissance (Voir figure (IV- 1)).

Une mesure des vitesses pour chaque moteur est assurée par des génératrices tachymétries, ces dernières envoient le signal de mesure à son variateur (Voir figure (IV- 1)).

Les deux commandes mécaniques tournées avec les deux moteurs sont reliées mécaniquement (voir chapitre 3).

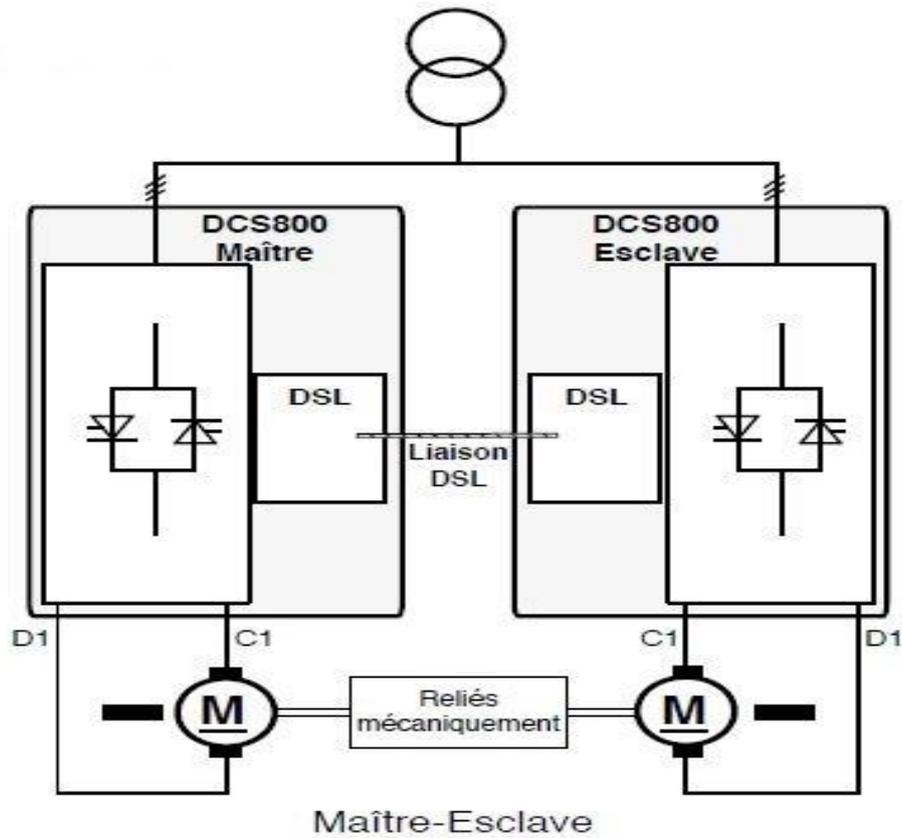


Figure (IV -1) : Schéma unifilaire

### IV-10-1 Dimensions des installations actuelles

#### Moteurs

Deux Moteurs à courant continue

$P=235\text{Kw}$

$V_n= 1000 \text{ r/m}$

$U_n=420 \text{ volts}$

$I_n= 601 \text{ Amp}$

Forme B3

IP 55

Mode de refroidissement : Echangeur Air/Eau



**Figure (IV -2) :** Moteur synchrone et refroidisseur.

## Variateurs de vitesse

Les deux variateurs sont de type CC

$U_1=400V$

$U_2=465V$

$I_1=980A$

$I_2=1200$

$F=50/60Hz$



Figure (IV -3) : Les deux variateurs de vitesse (Maitre/Esclave).

### Transformateur :

Les transformateur est de type SEC

P=1600KVA

5500V/420V

Ucc= 6.00%

Niveau d'isolement HT/BT = 60-20 0-10KV

IP 31



Figure (IV -4) : caractéristiques du transformateur.

### Câbles de puissance moteurs

Chaque moteur est alimenté par 4\* Câbles unifilaire 240mm Cu a une distance de 25 mètres sur un chemin de câble aérien.

### IV-11 Notion pour moteur électrique

La chaîne de transmission complète peut être représentée par la figure suivante :

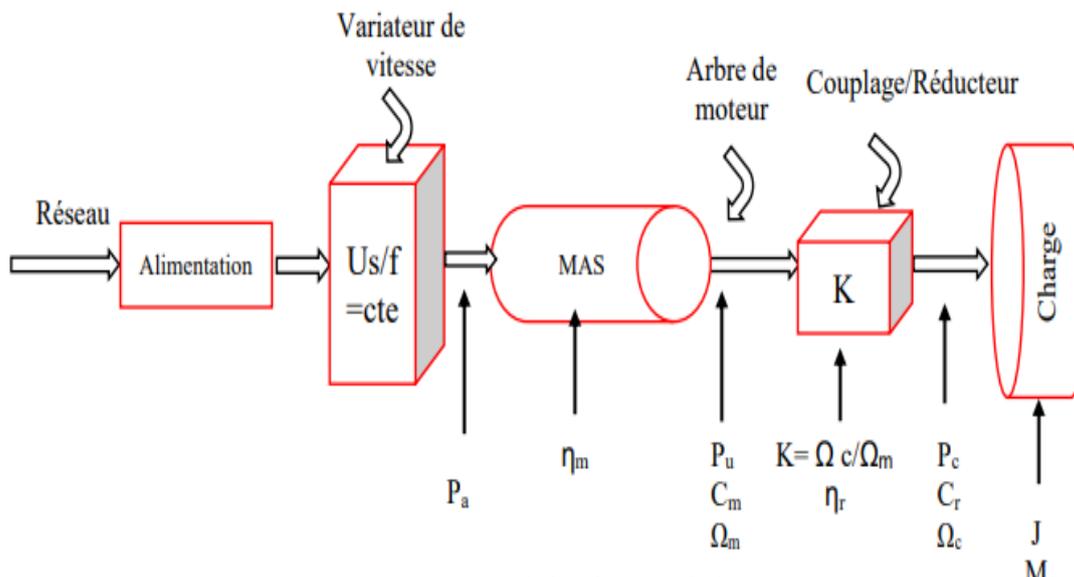


Figure (IV -5): Chaîne de transmission.

Indication :

$U_s$  : Tension de sortie du variateur.

$f$  : Fréquence d'alimentation.

$P_a$  : Puissance absorbé par le moteur en W ou kW.

$\eta_m$  : Rendement du moteur ( $\eta_m = P_u/P_a$ ).

$P_u$  : Puissance utile fournie par le moteur sur l'arbre en W ou Kw.

$C_m$  : Couple utile sur l'arbre moteur.

$\Omega_m$  : Vitesse de rotation de l'arbre moteur en rad/s.

$K$  : Rapport de réduction du réducteur ( $K = \Omega_c / \Omega_m$ ).

$\eta_r$  : Rendement du réducteur ( $\eta_r = P_c/P_u$ ).

$P_c$  : puissance demandée par la charge en W ou kW.

$\Omega_c$  : Vitesse de rotation de l'arbre moteur en rad/s.  $C_r$  : Couple résistant de la charge en N.m.  $J$  et  $M$  : Moment d'inertie et la masse de la charge (Kg/m<sup>2</sup> et Kg) respectivement.

### IV-11-1 Le modèle électrique

Dans présente partie, nous étudions le schéma électrique général de la machine Asynchrone et ses déférents schémas secondaires des moteurs asynchrones triphasés lorsqu'ils fonctionnent au régime permanent. Ensuite nous développons les équations simples qui décrivent leur fonctionnement. [19]

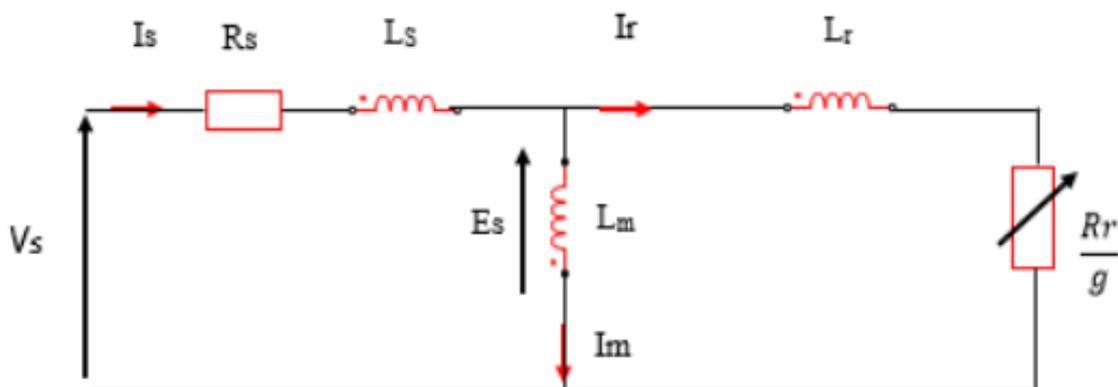


Figure (IV -6): Schéma équivalent du moteur asynchrone.

### ➤ La phase du moteur rotor ouvert

Dans ce cas, le rotor n'est pas entraîné  $\Omega = 0$  ou  $g = 1$ . La fréquence rotorique est donc aussi f. On peut donc dessiner un schéma équivalent de type transformateur comme suit :

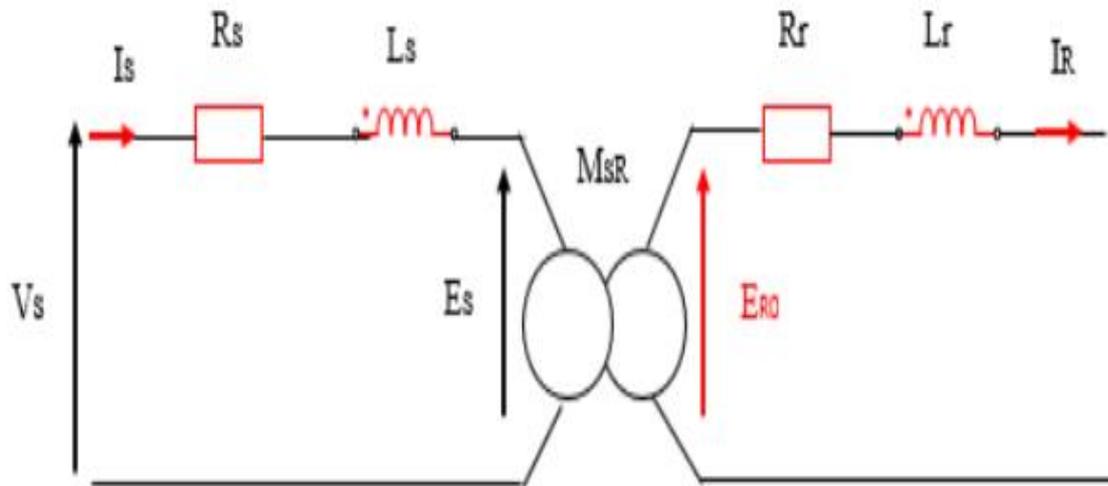


Figure (IV -7): Schéma équivalent à une phase du moteur rotor ouvert.

- Pour prendre en compte l'existence de l'entrefer et des pertes fer du moteur, le modèle peut être affiné en rajoutant l'ensemble  $R_f // L_f$  comme indiqué sur la Figure (IV -7).

### ➤ La phase du moteur rotor fermé

Dans ce cas  $\Omega \neq 0$  et  $g \neq 1$ . Si le secondaire est court-circuité, on peut écrire :

$$E_{R0} = (R_r + jgW_s L_r) I_R \quad (\text{IV-1})$$

Où les amplitudes complexes sont à la fréquence  $gW_s$  et où  $E_R$  a une valeur efficace proportionnelle à  $g$ .

En divisant par  $g$ , on obtient :

$$\frac{E_{R0}}{g} = \left( \frac{R_r}{g} + jW_s L_r \right) I_R \quad (\text{IV-2})$$

On constate alors que le rapport  $E_R/g$  ne dépend plus de  $g$  et a la même valeur que dans un fonctionnement à rotor ouvert  $E_{R0}$ . Par ailleurs, la pulsation apparaît comme étant la même que celle du primaire. On peut donc adopter le schéma du transformateur modifié comme suit :

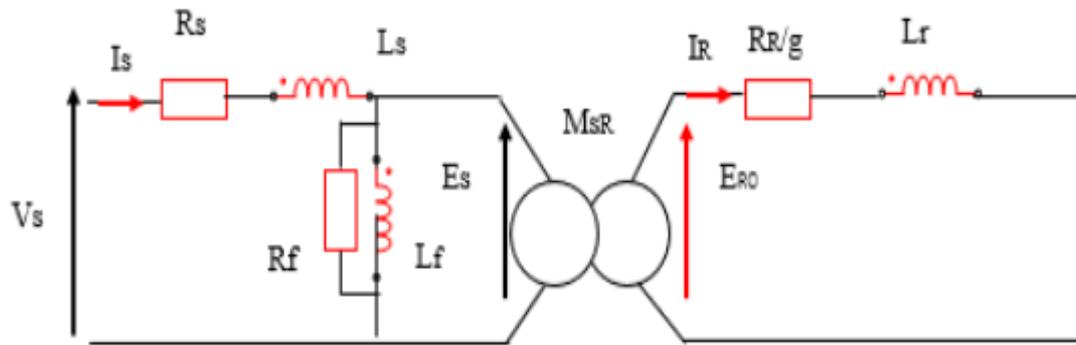


Figure (IV -8): Schéma équivalent à une phase du moteur rotor fermé.

### IV-11-2 Le démarrage du moteur asynchrone

Si l'on connecte soudainement un moteur asynchrone à une alimentation triphasée, par exemple à l'aide d'un interrupteur relié au 400 V / 50 Hz industriel, le courant électrique qu'il absorbe est 4 à 6 fois plus important que le courant nominal du moteur, alors que le couple mécanique disponible n'est que de ~40% du couple nominal.

Comme le montre la Figure (IV -9), ce couple peut être suffisant pour accélérer le moteur de l'arrêt jusqu'à son point de fonctionnement. La condition est que le couple demandé par la charge soit toujours inférieur à celui produit par le moteur pour toutes les vitesses intermédiaires. Une telle pointe de courant n'est pas toujours bienvenue, surtout si le moteur est de forte puissance, car il provoque des chutes de tension inacceptables pour les autres utilisateurs du réseau électrique [20].

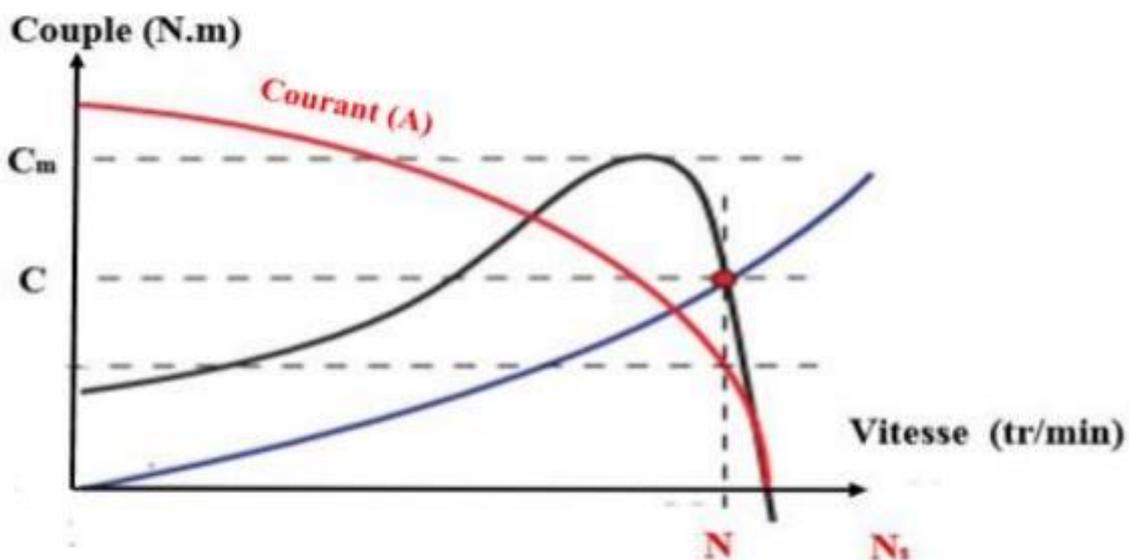


Figure (IV -9): Couple de démarrage du moteur asynchrone en fonction de sa vitesse

### IV-11-3 Les caractéristiques du moteur asynchrone [21]

#### ➤ Fonctionnement à vide

A vide, le moteur n'entraîne pas de charge par conséquent le glissement est nul et le moteur tourne à la vitesse de synchronisme.

$$g = 0 \text{ donc } n_s = n$$

Notons que le glissement :

$$g = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (\text{IV-3})$$

Au fonctionnement à vide ; le facteur de puissance à vide est très faible ( $< 0,2$ ) et le courant absorbé reste important (P est petit et Q est grand). On parle alors de courant réactif ou magnétisant (ils servent à créer le champ magnétique). [21]

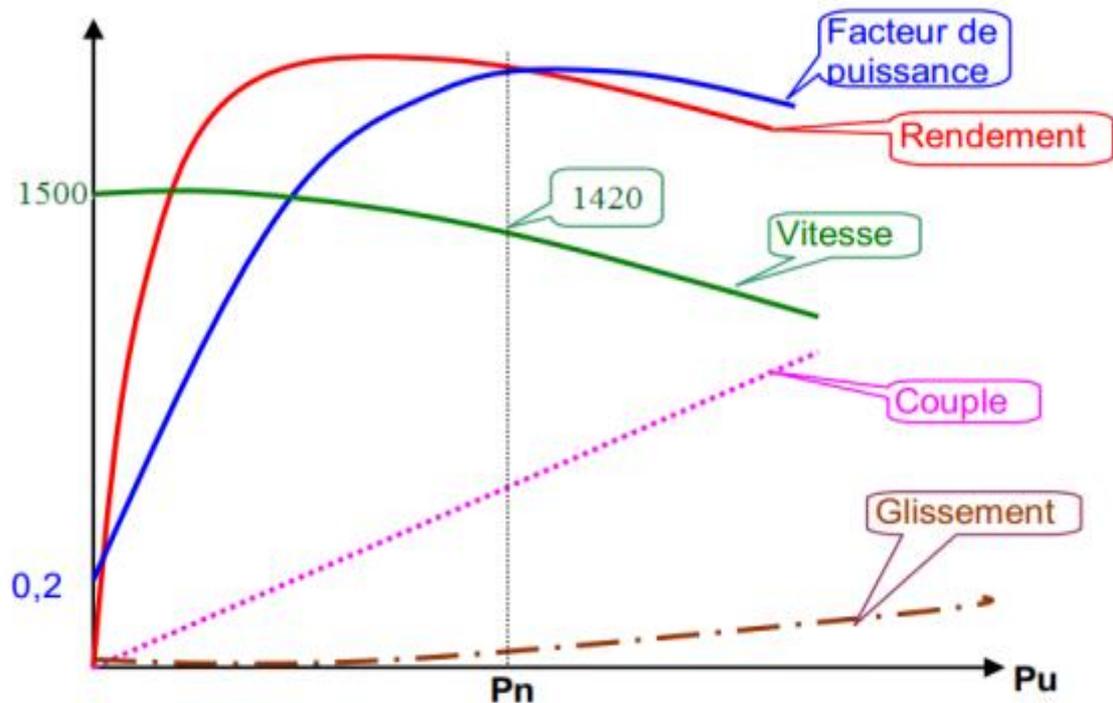
Avec :

- ✓  $n_s$  : Vitesse de rotation du champ en tr/s.
- ✓  $n_r$  : Vitesse de rotation du rotor.
- ✓  $g$ : glissement.

#### ➤ Fonctionnement en charge

Le moteur consomme maintenant de la puissance active, le stator appelle un courant actif, parce qu'on lui applique un couple résistant, et lorsque ce couple résistant augmente.

- La puissance mécanique à fournir par le moteur augmente.
- Le courant appelé augmente.
- La facture de puissance augmente.
- La fréquence de rotation baisse un peu.



**Figure (IV -10):** Caractéristiques du moteur asynchrone en fonction de la puissance utile.

### Remarques

On remarque que la valeur du facteur puissance baisse beaucoup quand la charge diminue. A vide il est d'environ 0,2. Il faut donc éviter d'installer des moteurs plus puissants qu'il n'est pas nécessaire. Le rendement est donc bon à partir de la demi-charge, il est maximal au voisinage de la puissance nominale. La vitesse décroît quand la charge augmente.

Toutefois la variation est faible puisqu'elle est seulement de 5 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge. Le glissement des gros moteurs est plus faible encore. C'est parce que les moteurs d'induction n'ont pas une vitesse rigoureusement constante et surtout parce que cette vitesse ne résulte pas seulement de la fréquence du courant d'alimentation qu'on les nomme moteurs asynchrones. Mais une variation de la vitesse de 2 à 5 % entre la marche à vide et la marche à pleine charge est négligeable dans la plupart des cas d'emplois industriels de moteurs.

On remarque que ; le moteur asynchrone est capable de démarrer en charge.

- **En régime nominal** :  $g_n = 3$  à  $10\%$

La vitesse du moteur	Le glissement	Fonctionnement de la machine
$n = 0$	$g = 1$	démarrage
$n = n_s$	$g = 0$	synchronisme
$0 < n < n_s$	$0 < g < 1$	moteur
$n > n_s$	$g < 0$	génératrice

Tableau (IV -2): Caractéristiques du moteur asynchrone.

- **Le point de fonctionnement**

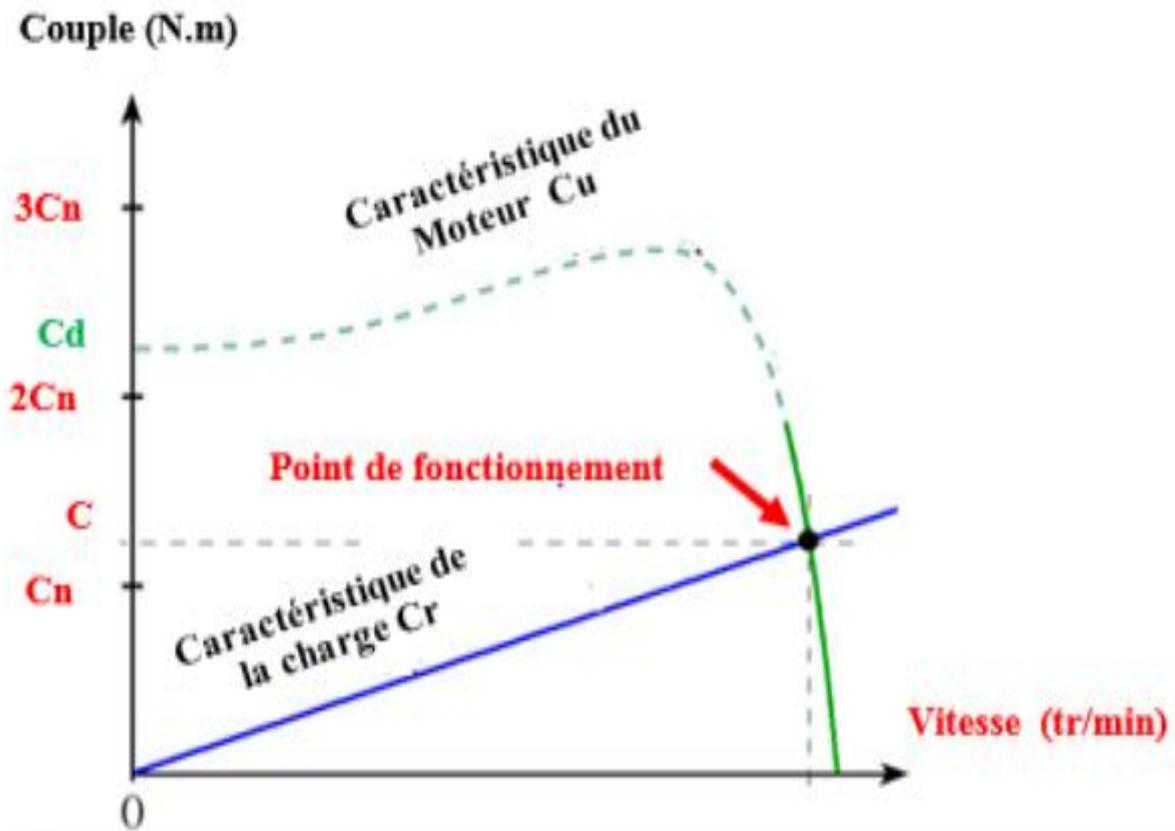


Figure (IV -11): Point d'intersection du couple utile du moteur et le couple résistant de la charge en fonction de la vitesse.

**Remarque**

On observe que le couple (C) varie avec vitesse de rotation du moteur accouplé à la charge entraînée (supposée fixe). Les caractéristiques du moteur et de la charge se croisent au point de fonctionnement pour lequel les couples moteur et résistant sont identiques.

➤ **Le rendement du moteur asynchrone**

Le rendement est égal au rapport de la puissance utile sur la puissance absorbée. Il est toujours inférieur à 1.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} < 1 \quad (\text{IV-4})$$

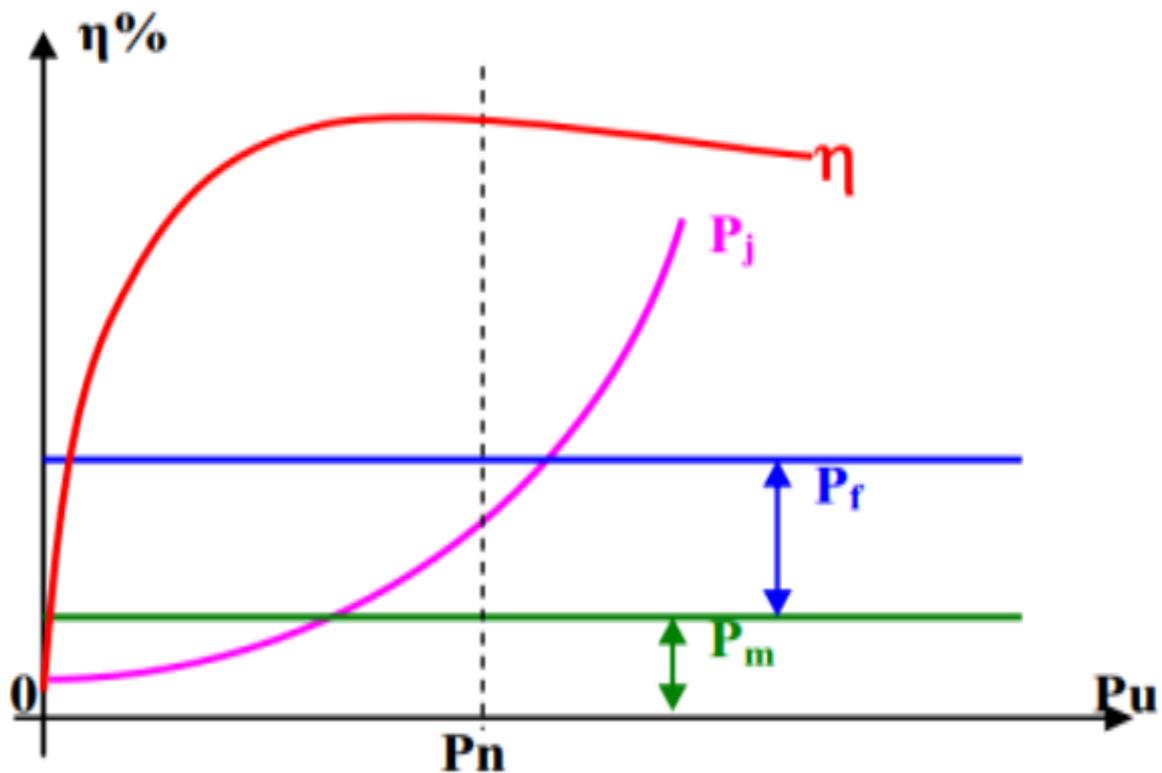


Figure (IV -12): Rendement du moteur asynchrone en fonction de la puissance utile.

#### IV-11-4 Entraînement des moteurs asynchrones

Tous les moteurs asynchrones peuvent être classés suivant la variation du couple et de la puissance en fonction de la vitesse, cependant on distingue quatre entraînements qui sont :

➤ **Couple constant**

Dans l'industrie, 90% des moteurs rencontrés, les pompes mise à part, sont des systèmes fonctionnant à couple constant.

Le couple demandé par le moteur est indépendant de la vitesse. Ce type de couple fonctionnement se trouve dans les convoyeur et les bondes transporteuses.

➤ **Puissance constante**

Pour les moteur fonctionnant à puissance constant, la puissance demandé est indépendante de la vitesse et le couple varie de façon inversement proportionnelle à la vitesse.

Ce type de fonctionnement se rencontré le plus souvent dans les moteurs outils et dans les systèmes d'enroulement.

➤ **Couple croissant linéairement la vitesse**

Pour ces moteur, le couple varie linéairement avec la vitesse, tandis que la puissance varie comme le carré de la vitesse. Ceci se rencontré avec certaines pompes volumétrique à vis d'Archimède et mélangeurs.

➤ **Couple croissant comme le carré de la vitesse**

Pour ces moteurs, le couple varie comme le carré de vitesse, tandis que la puissance varie comme le cube de la vitesse. Ce type de fonctionnement se rencontré avec les pompes centrifuge et le ventilateur.

#### **IV-11-5 Variation de vitesse d'un moteur asynchrone**

D'après l'équation (IV-5) on constate qu'on peut varier la vitesse en agissant sur les paramètres  $f$ ,  $p$ . [22]

➤ **Action sur les paires de pôles**

On s'aperçoit que d'après les formules précédentes la fréquence de rotation d'un moteur asynchrone triphasé est lié au nombre de paires de pôles  $p$  du bobinage.

- ✓ Si le nombre de paires de pôles augmente. La fréquence de rotation du moteur diminue.
- ✓ Si le nombre de paires de pôles diminue. La fréquence de rotation du moteur augmente.

### ➤ Action sur la fréquence d'alimentation du moteur

Toujours d'après les formules précédentes, on s'aperçoit que la fréquence de rotation d'un moteur asynchrone triphasé est directement liée à la fréquence  $f$  du réseau l'alimentant.

- ✓ Si la fréquence augmente, la fréquence de rotation d'un moteur augmente.
- ✓ Si la fréquence diminue, la fréquence de rotation d'un moteur diminue. Dans notre projet, nous nous intéressons à la variation de fréquence.

### IV-11-6 La variation de la fréquence

La solution passe par l'utilisation de variateur de fréquence, plus communément appelé variateur de vitesse. L'utilisation d'un tel convertisseur permet d'obtenir une plage de variation de vitesse allant de 0 ( $f = 0$  Hz) à la vitesse nominale du moteur ( $f = 50$  Hz). On peut même faire fonctionner le moteur en survitesse si la fréquence dépasse les 50 Hz.

La vitesse du champ magnétique et donc la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone dépend directement de la fréquence de la tension d'alimentation c'est sur ce paramètre que le variateur va agir. Le principe général étant de fournir un courant à amplitude et à fréquence variable tout en maintenant une tension constante.

### IV-11-7 L'intérêt du moteur asynchrone

Les moteurs asynchrones de forte puissance peuvent fonctionner à vitesse variable dans un large domaine (les derniers TGV, le Tram de Strasbourg, ...), Toutefois l'emploi de ce type de moteur est évité en très forte puissance ( $P > 10$  MW) car la consommation de puissance réactive est alors un handicap.

-utiliser dans le domaine des entraînements industriels à vitesse variable.

-le générateur asynchrone est beaucoup plus rare que l'alternateur, mais on le trouve dans quelques applications de puissance limitée comme la microcentrale hydraulique.

-le moteur asynchrone occupe surtout la plus grande part du marché des éoliennes, le plus souvent avec des machines à cage d'écureuil pour la puissance modeste.

### IV-12 Notions sur le Variateur de vitesse

Pour modifier la vitesse d'un moteur, il faut simplement modifier la forme de sa caractéristique mécanique :

$$T = f(N)$$

T : couple.

N : vitesse de rotation

Pour cela on peut agir :

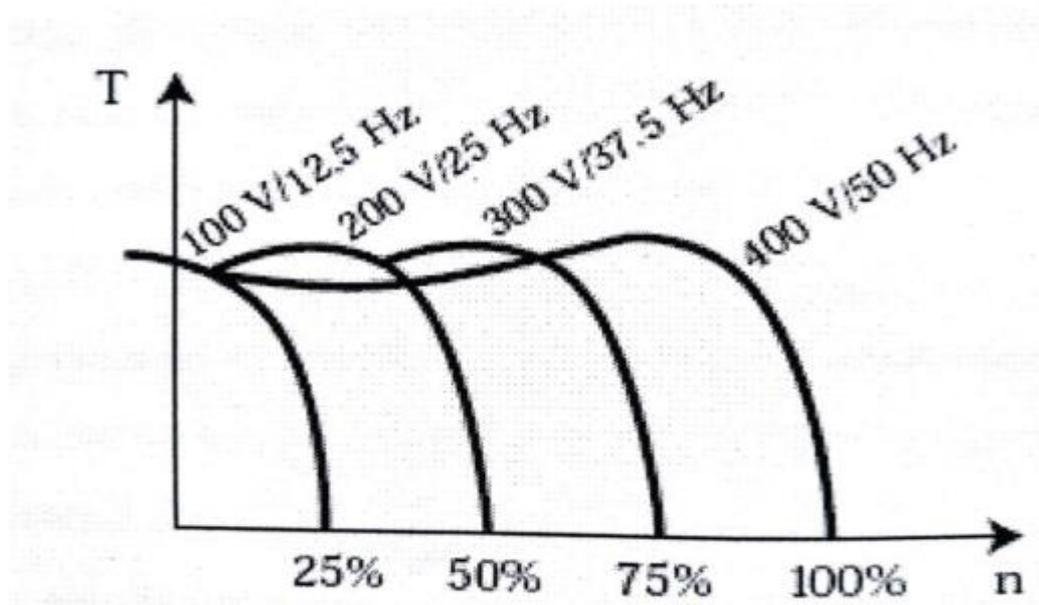
- ✓ Soit sur la tension statorique.
- ✓ Soit sur la résistance rotorique (uniquement les moteurs à rotor bobiné).
- ✓ Soit sur la fréquence des courants statoriques.

Néanmoins, la véritable solution pour faire tourner un moteur asynchrone à vitesse variable, tout en conservant un rendement satisfaisant, est de l'alimenter à fréquence variable.

Cette méthode n'est limitée que par l'amplitude du champ le long de l'entrefer qui doit garder la même valeur que l'état de saturation des tôles reste constamment optimal. Pour cela il faut faire varier la tension statorique au même temps que la fréquence [23].

Deux types de convertisseurs peuvent réaliser ce procédé :

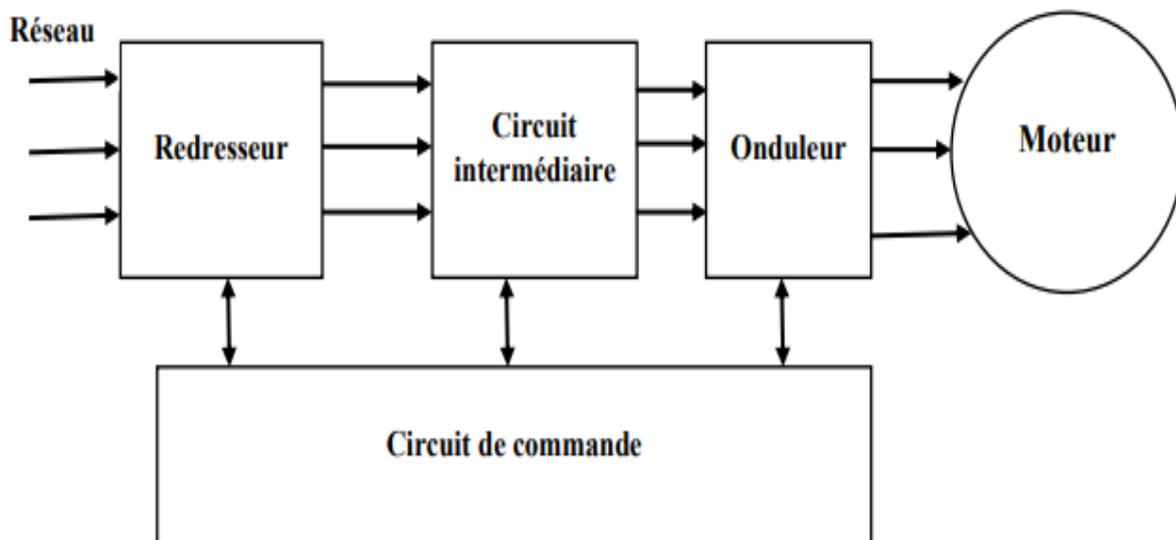
- Un cycloconvertisseur.
- L'association redresseur-onduleur; La variation de la fréquence d'alimentation entraîne une translation de la caractéristique mécanique du moteur.



**Figure (IV -13):** Caractéristiques mécaniques d'une MAS pour plusieurs fréquences d'alimentation

Le variateur utilisé dans notre étude est le deuxième type cité ci-dessous, qui est le plus utilisé dans l'industrie.

Ce variateur est formé de quatre composants principaux : redresseur, filtre, onduleur et circuit de commande.



**Figure (IV -14):** Variateur de vitesse simplifié. [23]

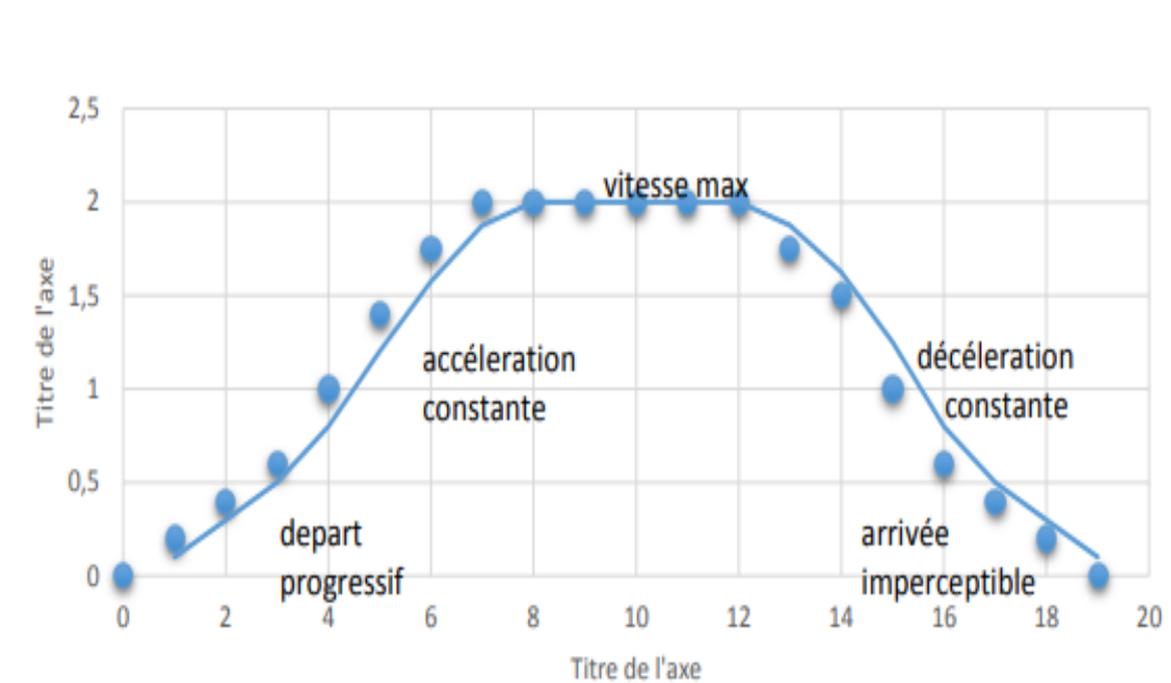
### IV-12-1 Description de fonctionnement

La tension alternative triphasée est convertie en tension continue par l'intermédiaire du pont redresseur et d'un filtre. Cette tension continue est alors découpée par un pont onduleur à transistors. L'ajustage de la largeur des impulsions et leurs répétitions permet d'ajuster l'alimentation du moteur en tension et en fréquence afin de garantir un rapport tension/fréquence constant dans le moteur.

Un signal externe de vitesse est transmis au bloc de commande ASIC (action par microprocesseur). Le bloc de commande, après comparaison des signaux internes et externes, génère les impulsions de commande des transistors.

Le variateur de vitesse permet :

- Une gamme de vitesse de 5% à 200% de la vitesse nominale.
- Une conservation du couple sur toute la gamme de vitesse.
- Des rampes d'accélération et de décélération.
- Deux sens de rotation [23].



**Figure (IV -15):** courbe graphique de fonctionnement de variateur

IV-12-2-Schéma de câblage de variateur de vitesse

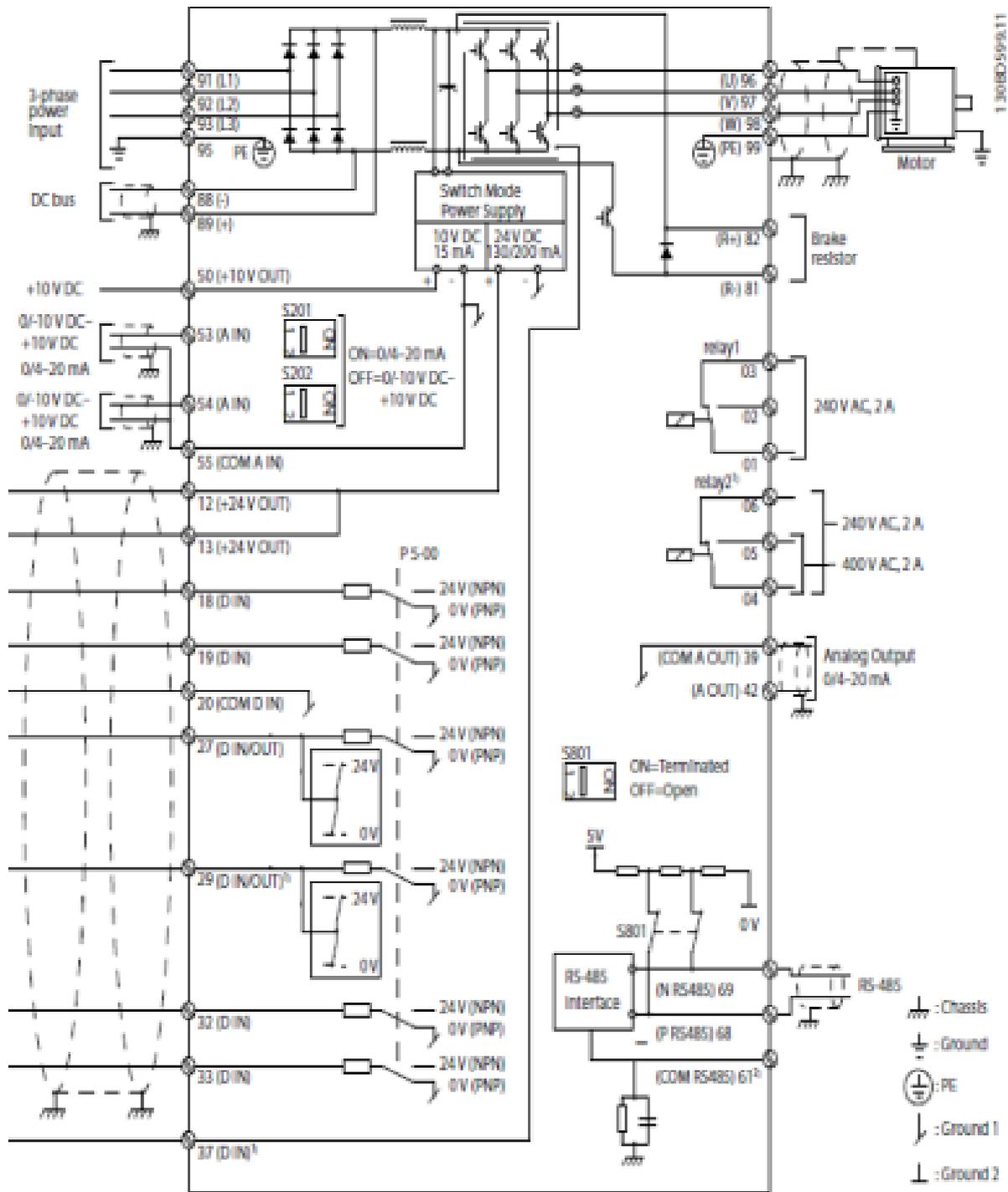


Figure (IV -16): Schéma de câblage de base.

### **IV-12-3 Principe de fonctionnement de l'ensemble (variateur de vitesse – moteur)**

#### ➤ **Schéma électrique du système**

La (Figure IV.16), représente le schéma électrique de système qui est composée d'un variateur qui alimente deux moteurs asynchrones (moteur de l'anneau rotatif).

#### ➤ **Les composantes de schéma électrique**

Le schéma de la figure(IV.16) est composé de quatre parties principales :

- + Une source triphasée (3 phases).
- + Variateur de vitesse.
- + Deux moteurs asynchrones qui alimentent l'anneau rotatif.
- + Un automate programmable (S 7300).

### **IV-12-4 La variation et la régulation de vitesse**

Parmi les fonctionnements classiques des variateurs de vitesse, on distingue :

- La variation de vitesse proprement dite où la vitesse du moteur est définie par une consigne d'entrée (tension ou courant) sans tenir compte de la valeur réelle de la vitesse du moteur qui peut varier en fonction de la charge, de la tension d'alimentation, ... On est en boucle "ouverte" (pas de feedback).
- La régulation de vitesse où la consigne de la vitesse du moteur est corrigée en fonction d'une mesure réelle de la vitesse à l'arbre du moteur introduite dans un comparateur. La consigne et la valeur réelle de la vitesse sont comparées, la différence éventuelle étant corrigée. On est en boucle "fermée".

### **IV-12-5 L'inversion du sens de marche**

Sur la plupart des variateurs de vitesse, il est possible d'inverser automatiquement le sens de marche. L'inversion de l'ordre des phases d'alimentation du moteur de l'ascenseur s'effectue

- Soit par inversion de la consigne d'entrée.
- Soit par un ordre logique sur une borne.
- Soit par une information transmise par une connexion à un réseau de gestion.

### IV-12-6 Le freinage d'arrêt

C'est un freinage de sécurité pour les ascenseurs :

- Avec des moteurs asynchrones, le variateur de vitesse est capable d'injecter du courant continu au niveau des enroulements statoriques et par conséquent stopper net le champ tournant, la dissipation de l'énergie mécanique s'effectuant au niveau du rotor du moteur (danger d'échauffement important).
- Avec des moteurs à courant continu, le freinage s'effectue au moyen d'une résistance connectée sur l'induit de la machine.

### IV-12-7 Critères de choix d'un variateur

Les critères du choix du variateur de vitesse à installer pour les moteurs asynchrones sont nombreux

- ✓ La tension du réseau d'alimentation.
- ✓ Type de rotor du moteur (bobiné ou cage).
- ✓ La puissance et la vitesse nominale.
- ✓ Le régime d'utilisation (régime permanent ou intermittent).
- ✓ La plage de variation de la vitesse.
- ✓ Type de variation de la vitesse (progressive ou échelonnée).
- ✓ Le type du couple résistant de la charge entraînée.
- ✓ La précision de contrôle de couple et de la vitesse.
- ✓ Les contraintes d'installation (place disponible, degrés de protection).
- ✓ Le coût total d'investissement (le coût du variateur et son installation). [24]

### IV-12-8 Choix du variateur de fréquence

Les paramètres qui nous permettent de choisir un variateur de fréquence qui convient pour le moteur asynchrone à cage sont : moteur asynchrone triphasé, réseau triphasé, la tension d'alimentation (400V), la puissance nominale du moteur et la fréquence d'alimentation ( $f = 50$  Hz), est en fonction du courant du moteur actuel à la charge maximale de l'installation. Le courant nominal de sortie du variateur de fréquence  $I_{INV}$ . Doit être supérieur ou égal au courant moteur nécessaire. [25]

### IV-13 Notions pour transformateur

Le réseau délivre une moyenne de tension de 5,5 kV, et au sein de notre projet, la tension au niveau des récepteurs est de 400V.

Afin de choisir le transformateur de puissance normalisée adéquat à notre installation, on s'intéresse au bilan de puissance totale utilisée qui va nous permettre grâce au tableau n°1 de l'annexe A de déterminer la puissance apparente normalisée et donc le transformateur convenable.

Le choix du transformateur se portera sur le transformateur qui porte une puissance apparente normalisée de 1600kVA.

#### ❖ Calcul du rapport de transformation

On détermine le rapport de transformation tout en supposant que le primaire et le secondaire ont le même couplage, pour cela, on va appliquer la formule suivante pour le calculer :

$$m = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{U_2}{U_1} \quad (\text{IV-5})$$

Avec :

$I_1, I_2$  : Courant primaire et secondaire du transformateur.

$N_1, N_2$  : Nombre de spires au primaire et au secondaire du transformateur.

$U_1, U_2$  : Tension primaire et secondaire du transformateur.

#### ❖ Calcul du courant secondaire

Le courant assigné au secondaire du transformateur, côté BT, est déterminé par l'expression :

$$I_n = \frac{S_n}{U_{20} \cdot \sqrt{3}} \quad (\text{IV-6})$$

$I_n$  : Courant assigné du transformateur, côté BT (valeur efficace) (A).

$S_n$  : puissance assignée du transformateur (kVA).

$U_{20}$  : Tension assignée secondaire (à vide) du transformateur (V).

### ❖ Calcul du courant primaire

Pour calculer le courant primaire du transformateur, on applique la formule suivante :

$$m = \frac{I_1}{I_2} \quad (\text{IV-7})$$

$$I_1 = m * I_2 \quad (\text{IV-8})$$

### ❖ Détermination de la tension de court-circuit $U_{cc}$

Pour le transformateur de distribution (norme NBN - HD 428 1 S1),  $U_{cc}$  a des valeurs normalisées. D'après le tableau n°2 de l'annexe, on trouve que la tension de court-circuit de notre transformateur  $U_{cc} = 6\%U$ , ce qui nous donne  $U_{cc} = 24V$ .

## IV-14 Notions pour les câbles

La section d'un câble doit satisfaire aux conditions techniques suivantes :

- Un échauffement normal de l'âme conductrice n'entraînant pas détérioration des propriétés isolantes des constituants de l'enveloppe et de la gaine lorsqu'elle fait transiter l'intensité admissible en régime permanent, cette condition doit prendre en compte :

- ✓ La constitution du câble.
- ✓ Le mode et les conditions de pose qui limitent les échanges thermiques du câble avec l'environnement.
- ✓ La température du milieu ambiant (air ou terre).

- Une chute de tension au plus égale :

- ✓ Aux limites réglementaires.
- ✓ Ou à l'écart accepté entre la tension disponible au départ et la tension souhaitée à l'arrivée.

- Une bonne tenue à une surintensité de courte durée due à un courant de court-circuit et qui se traduit par des courants intenses dans les écrans métalliques des câbles d'où une augmentation de l'échauffement et un risque de détérioration accrue.

A ces conditions s'ajoutent :

- Des conditions de sécurité, protection contre les contacts indirects.

- Une condition économique, cette condition, consiste à rechercher la section qui, en régime permanent, rend minimale la somme du coût d'investissement et du coût d'exploitation.

## IV-14-1 Constitutions d'un câble électrique

### Câble BT

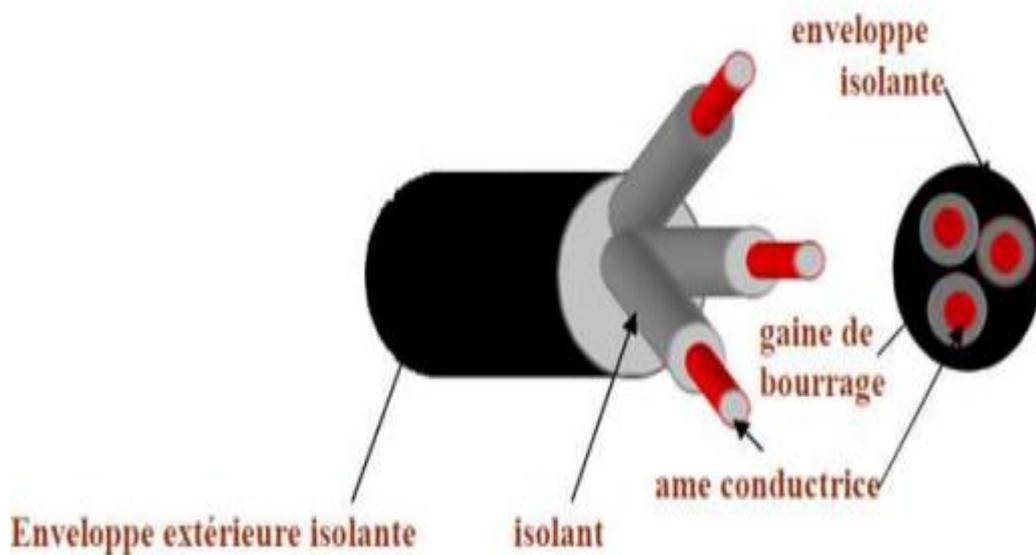


Figure (IV -17): Constitution d'un câble BT.

## IV-14-2 Détermination des sections des câbles en basse tension

### Méthode de calcul

La détermination de la section d'un câble se fait selon les critères suivants :

- Calcul de la section technique.
- Calcul de la section économique.

## IV-14-3 Organigramme de la méthode

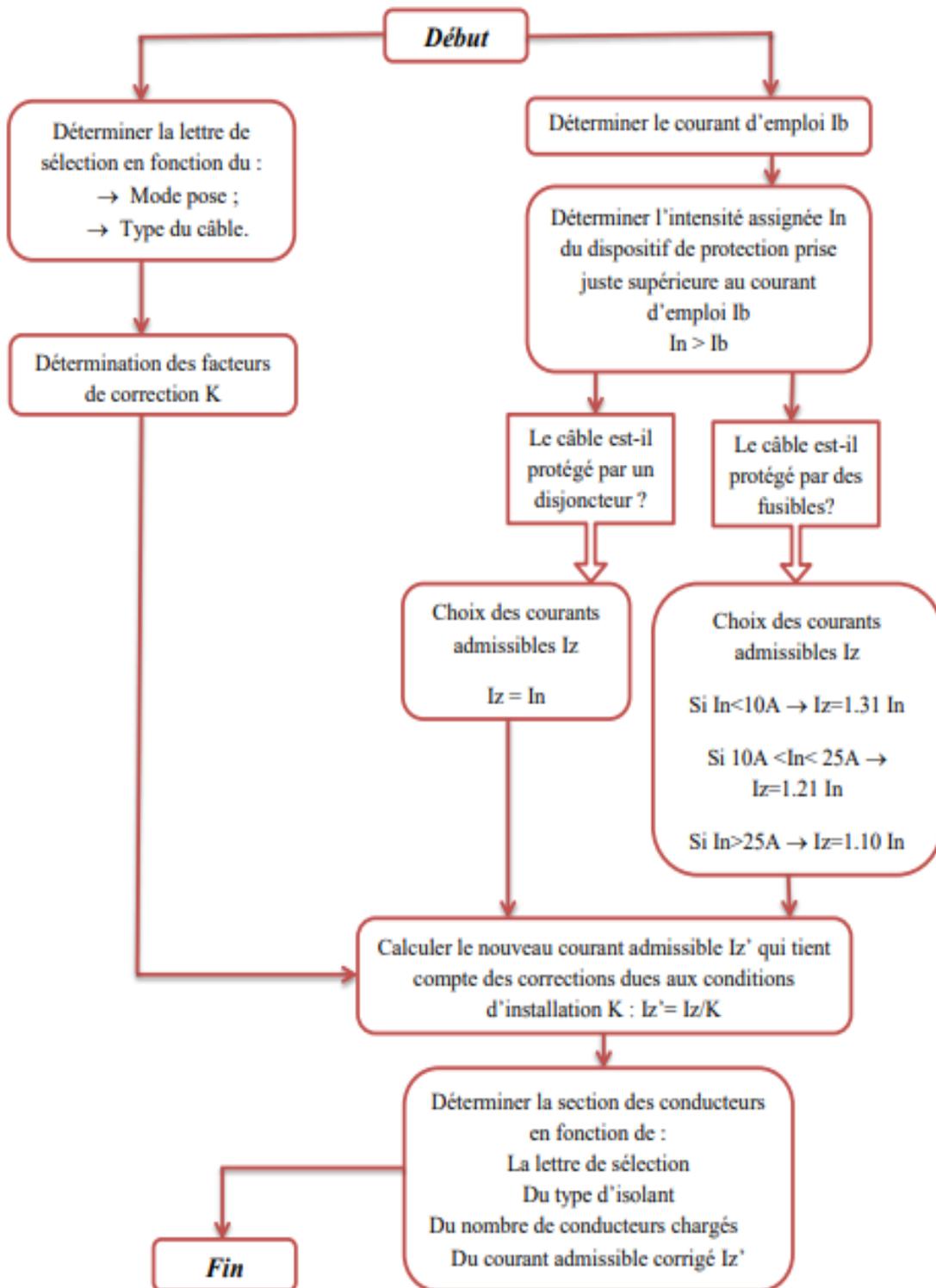


Figure (IV -18): Organigramme de la méthode

#### IV-14-4 Calcul de la section technique

La détermination de cette section consiste à trouver la section normalisée appartenant au type du câble choisi, et satisfait les trois conditions suivantes :

- ✓ Échauffement normal.
- ✓ Chute de tension admissible.
- ✓ Surcharge due au court-circuit.

#### IV-14-5 Calcul de la section selon l'échauffement $S_j$

En fonction des conditions environnementales et les critères des conducteurs, des facteurs de correction sont appliqués pour la détermination des courants admissibles des canalisations. Les conditions dans lesquelles l'installation est dimensionnée sont les suivantes :

- ✓ Le mode de pose.
- ✓ Le type d'éléments conducteurs.
- ✓ L'influence mutuelle des autres circuits.
- ✓ La température ambiante.
- ✓ La nature de l'isolant.
- ✓ L'intensité nominale du courant d'emploi  $I_b$ .

#### IV-14-6 Calcul de la section selon la chute de tension $S_z$

La chute de tension sur une canalisation est calculée par les formules ci-dessous :

$$\Delta U = \sqrt{3} I_b (R \cos \varphi + X \sin \varphi) * L \quad (\text{IV-9})$$

$$\Delta U = \sqrt{3} I_b \left( \frac{\rho L}{S} \cos \varphi + \lambda L \sin \varphi \right) \quad (\text{IV-10})$$

Avec :

$I_b$  : Courant d'emploi en ampère.

$\rho$  : Résistivité du conducteur en service normal,  $\rho = 0,0225 \text{ mm}^2/\text{m}$  pour le cuivre.

$L$  : longueur du câble en m.

$S$  : section des conducteurs en  $\text{mm}^2$ .

$\lambda$  : Réactance linéique des conducteurs,  $\lambda = 0,08 \times 10^{-3} / \text{m}$  pour les câbles tripolaires. [26]

## IV-15 Notions pour des jeux de barres

Les jeux de barres à basse tension sont destinés à assurer le transport d'énergie électrique entre éléments d'une installation la fournissant (générateurs, transformateurs...) et la répartissant (tableaux généraux de distribution dits TGBT) ; ils peuvent également être une partie de ces derniers ou d'ensembles d'appareillage à basse tension faisant l'objet de normes particulières. Ils peuvent être utilisés en tant que canalisations de distribution, mais cette fonction est plus généralement confiée aux systèmes de canalisations préfabriqués, également normalisés.

On les utilise, dans le cas de transport, en concurrence avec des câbles isolés, mais leur intérêt est, avant tout, économique car, à puissance transportée égale, ils reviennent sensiblement moins cher, le métal (cuivre ou aluminium) étant mieux utilisé.

Les principaux problèmes posés par l'emploi des jeux de barres peuvent se regrouper en deux catégories :

- Les conditions d'équilibre thermique avec leur environnement immédiat, qui déterminent les courants admissibles, pour une température acceptable du métal ; elles sont soumises à l'influence de nombreux facteurs.
- Les conditions de réalisation mécanique, en fonction des contraintes susceptibles de leur être appliquées, tant en service normal qu'en cas de défaut (court-circuit).

### A-Calcul du courant admissible $I_{ad}$

Le courant admissible maximal est estimé à 120% du courant nominal qui parcourt les jeux de barres. La formule suivante nous permet de calculer le courant admissible :

$$I_{ad} = 1,2 * I_n \quad (\text{IV-11})$$

### B-Vérification de la tenue thermique

La formule de MELSON & BOOTH permet de définir l'intensité admissible dans un conducteur :

$$I = K * \frac{24,9 * (\theta - \theta_n)^{0,61} * S^{0,5} * P^{0,39}}{\sqrt{\rho_{20} * [1 + \alpha(\theta - 20)]}} \quad (\text{IV-12})$$

Avec :

- I : Intensité de courant admissible en A.
- $\theta_n$  : Température ambiante en °C (dans notre cas la température ambiante égale à (30°C)).
- $(\theta - \theta_n)$  : Echauffement admissible en °C.
- S : Section d'une barre en cm<sup>2</sup>.
- P : Périmètre d'une barre en cm.
- $\rho_{20}$  : Résistivité du conducteur à 20°C (Cuivre : 1.83μΩ/cm, Aluminium : 2.90μΩ/cm).
- $\alpha$  : Coefficient de température de la résistivité,  $\alpha = 0,004$ .
- K : Coefficient de conditions, avec  $K=K1 * K2 * K3 * K4 * K5 * K6 * K7 * K8$ .

### C- L'échauffement dû au courant de court-circuit

Pour le calcul de l'échauffement dû à un court-circuit, on utilise la formule suivante :

$$\Delta\theta_{cc} = 0,24 * \frac{\rho_{20} * I_{th} * t_k}{(n * s)^2 * C * \delta} \quad (\text{IV-13})$$

Avec :

$\Delta\theta_{cc}$  : Echauffement dû au court-circuit (°C).

$\rho_{20}$  : Résistivité du conducteur à 20°C (Cuivre : 1.83μΩ/cm, Aluminium : 2.90μΩ/cm).

$I_{th}$  : est le courant de court-circuit de courte durée.

$t_k$  : Durée du court-circuit de courte durée (1 à 3 s).

n : Nombre de barre(s) par phase.

S : Section d'une barre en cm<sup>2</sup>.

C : Chaleur spécifique du métal (Cuivre : 0,091 kcal/daN°C, Aluminium: 0,23 kcal/daN °C).

$\delta$  : Masse volumique du métal (Cuivre: 8,9 g/cm<sup>3</sup>, Aluminium: 2,7 g/cm<sup>3</sup>).

## IV-16 Calcul et choix de la nouvelle installation électrique

### ➤ Choix des deux moteurs

#### Puissance

La puissance mécanique finale calculée dans le chapitre 3 est à l'ordre de 400kW (voir Figure(III.18)) Si on va prendre en considération une future amélioration pour tourner le four par une vitesse de 3tr/min pour augmenter le débit du four.

D'autre part, il faut toujours laisser une marge de sécurité de 30% lors des études électrique, pour cela :

$$P = P \text{ calculé} + (P \text{ calculé} * 30\%) \quad (\text{IV-14})$$

$$P = 400 * 1,3 = 520 \text{ KW} \quad (\text{IV-15})$$

Si on cherche la puissance de 520 kW on va trouver par exemple dans la gamme Siemens un moteur de 560 kW sur le palier qui suit notre puissance choisis.

#### Tension :

400 Volt (suivant installation standard usine de Meftah).

#### Fréquence :

50HZ (suivant la fréquence du pays).

#### Classe d'isolation :

Echauffement pour fonctionnement avec variateur de vitesse  $T=155^{\circ}\text{C}$ , on va choisir la classe F (par défaut pour une température ambiante jusqu'à  $40^{\circ}\text{C}$ ).

#### Vitesse de rotation :

1500 tr/min (suivant vitesse max entré réducteur).

#### Indice de Protection :

IP55

5= Protégé contre les poussières et autres résidus microscopiques.

5= Protégé contre les jets d'eau de toutes directions à la lance (buse de 6,3 mm, distance 2,5 à 3 m, débit 12,5 l/min  $\pm$ 5 %).

A titre d'exemple plaque signalétique du moteur sera comme l'image suivante :

V	Hz		A	kW	cos $\varphi$	1/min	I <sub>A</sub> / I <sub>N</sub>	T <sub>E</sub> s	Certif.No	IP
440 $\Delta$	50		860	560	0.88	1490				55

**Figure (IV -19):** Plaque signalétique de moteur asynchrone

### ➤ Choix des deux variateurs de la vitesse

Selon le standard de l'usine, les variateurs de vitesses BT sont de marque ABB. Rester sur la même marque permet de faciliter la préconisation de la pièce de rechange et garder le même niveau de compétence des techniciens.

Le tableau ci-dessous présente la dernière gamme des variateurs BT de ABB.

Selon la puissance des moteurs Choisis, on choisit la référence encadré par le rouge.

$U_n = 400 \text{ V}$  (plage 380 à 415 V). Valeurs de puissance valables à tension nominale de 400 V (45 à 1400 kW).

Type de variateur	Taille	Valeurs nominales			Utilisation faible surcharge		Utilisation intensive		Niveau sonore (dB(A))	Dissipation thermique (W)	Débit d'air (m <sup>3</sup> /h)
		$I_n$ (A)	$I_{max}$ (A)	$P_n$ (kW)	$I_{sc}$ (A)	$P_{sc}$ (kW)	$I_{int}$ (A)	$P_{int}$ (kW)			
ACS880-17-0105A-3	RB	105	148	55	100	55	87	45	70	2200	700
ACS880-17-0145A-3	RB	145	178	75	138	75	105	55	70	3300	700
ACS880-17-0169A-3	RB	169	247	90	161	90	145	75	70	3570	700
ACS880-17-0206A-3	RB	206	287	110	196	110	169	90	70	4440	805
ACS880-17-0293A-3	R11	293	418	160	278	160	246	132	77	6900	2100
ACS880-17-0363A-3	R11	363	498	200	345	200	293	160	77	8500	2100
ACS880-17-0442A-3	R11	442	545	250	420	250	363	200	77	10500	2100
ACS880-17-0505A-3	R11	505	560	250	480	250	363	200	77	10600	2100
ACS880-17-0585A-3	R11	585	730	315	556	315	442	250	77	13200	2100
ACS880-17-0650A-3	R11	650	730	355	618	355	505	250	77	14800	2100
ACS880-17-0450A-3	1xRBI+1xRBI	450	590	250	432	200	337	160	75	14000	3760
ACS880-17-0620A-3	1xRBI+1xRBI	620	810	355	595	315	464	250	75	18000	3760
ACS880-17-0870A-3	1xRBI+1xRBI	870	1140	500	835	450	651	355	75	27000	3760
ACS880-17-1110A-3	2xRBI+2xRBI	1110	1450	630	1066	560	830	450	77	31000	7220
ACS880-17-1210A-3	2xRBI+2xRBI	1210	1580	710	1162	630	905	500	77	34000	7220
ACS880-17-1430A-3	2xRBI+2xRBI	1430	1860	800	1373	710	1070	560	77	38000	7220
ACS880-17-1700A-3	2xRBI+2xRBI	1700	2210	1000	1632	900	1272	710	77	51000	7220
ACS880-17-2060A-3	3xRBI+3xRBI	2060	2680	1200	1978	1100	1541	800	78	61000	11580
ACS880-17-2530A-3	3xRBI+3xRBI	2530	3290	1400	2429	1200	1892	1000	78	76000	11580

Figure (IV -20): valeur nominale, types et tensions (variateurs régénératifs en armoire ACS880-17)

### ➤ Choix du transformateur 5,5kV / 400 V

Selon le courant nominal des deux moteurs ( $I_n=860\text{A}$ ), le courant max que le transformateur doit fournir est :

$$I=2*I_n \text{ moteur} \quad (\text{IV-16})$$

$$I=2*860=1720\text{A}$$

Le transformateur existant

$$I_n = 2199 \text{ A}$$

$$\text{Charge sur transfo} = 1720/2199 = 78\%$$

Donc on garde le même transformateur et donc les jeux de barres qui alimentent l'armoire des variateurs.



Figure (IV -21) : Plaque signalétique transformateur

### ➤ Choix et calcul de la section des câbles de puissance de chaque moteur

$$S = (\rho \times 2L \times I) / U' \quad (\text{IV-17})$$

$I$  : Courant d'emploi en ampère.

$\rho$  : Résistivité du conducteur en service normal,  $\rho = 0,0225 \text{ mm}^2/\text{m}$  pour le cuivre.

$L$  : longueur du câble en m.

$S$  : section des conducteurs en  $\text{mm}^2$ .

$$S = (0,0225 \times (2 \times 25) \times 860) / 3\% \times 400$$

$$S = 80,6 \text{ mm}^2$$

Selon le courant nominal des deux moteurs ( $I_n=860A$ ), le courant max que le transformateur doit fournir.

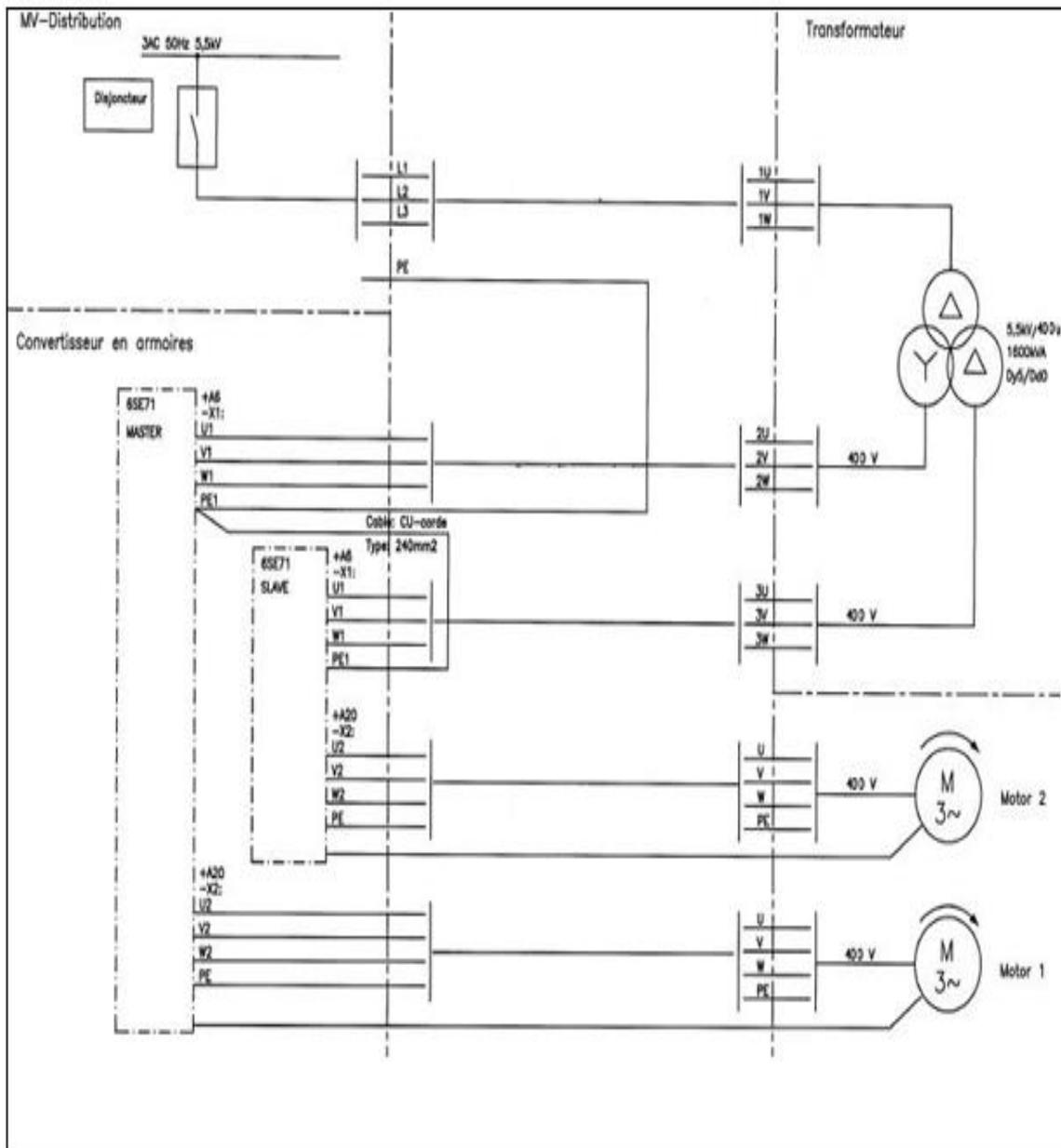


Figure (IV -22) : Schéma unifilaire dans nouvelle installation.

## IV-17 Conclusion

Dans la première partie nous avons exhibé un aperçu général sur les entraînements électriques et les moteurs les plus utilisés, en suite nous avons donné une vue globale sur les moteurs à courant alternatif, concernant le choix du moteur pour notre étude expérimentale, nous avons choisis le moteur asynchrone à cage, car il est robuste, fiable et ayant une durée de vie élevée.

Dans la deuxième partie nous avons fait le choix d'un variateur de vitesse qui n'est pas systématique, mais qui dépend de plusieurs critères dont la puissance du moteur, ainsi que la gamme de vitesse, et les quadrants de fonctionnement. Les exigences de l'application et de l'architecture du système dans lequel il est installé.

La nouvelle installation à moteur asynchrone à cage est meilleure par rapport à l'ancienne installation à moteur synchrone à courant continu, il reste juste qu'elle soit réalisée pour son utilisation.

Conclusion générale

## Conclusion générale

La fabrication de ciment est l'un des domaines indispensables pour le secteur habit et construction, qui est en plein essor ces dernières années, les progrès de l'industrie cimentières furent conditionner par le développement de la connaissance scientifique des processus de fabrication ainsi que son fonctionnement.

Pour tous ceci nous avons contribué à ce domaine à travers un modeste projet qui rentre dans le cadre de la préparation de notre mémoire de fin d'études Master. Cette étude consiste à traiter le problème majeur pour les deux moteurs synchrones(CC) ancien du four rotatif, qui cause pratiquement assez souvent l'arrêt de la machine suite à des défaillances de type mécanique ou électrique. Cet arrêt souvent engendre beaucoup de pertes, de temps et économique. Toutes ces pertes influent sur le rendement global de la production puisque la partie motrice est la plus essentielle dans l'industrie

Le présent travail s'inscrit dans le cadre des études expérimentales sur les moteurs asynchrones.

Une étude préliminaire théorique été nécessaire pour ce faire, elle nous a permis de connaitre les entrainements électriques en générale et en particulier le moteur asynchrone mais aussi bien de connaitre le comportement du variateur de vitesse , ce qui est a amené d'une part à classer les déférents procédés permettant de faire varier la vitesse du moteur asynchrone, et d'autre part à citer les types du variateurs de vitesses et leurs structures internes.

Afin d'aborder cette étude, nous avons élaboré au premier lieu une présentation de la société ainsi connaitre le processus de la fabrication de ciment au sien de la cimentier de Meftah, ceci nous a permis de bien cerner notre objectif d'étude vis-à-vis l'emplacement de notre machine d'études dans la société, aussi voir l'aspect pratique des connaissances déjà acquis durant le cursus universitaire.

Nous avons de même appris quelques généralités sur les entrainements électriques et les moteurs utilisés sauvent dans l'industrie, pour bien avoir une image globale du moteur asynchrone, son principe de fonctionnement et ses caractéristiques de base.

La présente étude nous permis les résultats suivant :

1 / Diminuer la maintenance des moteurs, puisque le moteur à courant continu nécessite une fréquence élevé de plusieurs taches de maintenance.

2 / Obsolescence de la pièce de rechange électrique à courant-continu pour les moteurs ainsi que les variateurs de vitesses (VSD & Moteurs).

3 / Possibilité d'augmenter en débit, puisque l'étude de la nouvelle installation prend en considération l'augmentation de la vitesse four jusqu'à 3tr/min

4/ Nous avons eu l'avantage d'apprendre les différentes techniques expérimentales pour faire l'étude théorique de notre projet de l'installation électrique adéquate avec les composantes de la chaine de production de la cimenterie.

En perspective, nous proposons de faire la réalisation pratique de ce projet.



## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] : Cours électrotechnique, 1A électronique. Consulté le 11 juin 2018. Disponible sur : < [https://www.emse.fr/~dutertre/documents/Cours\\_ET\\_1A\\_imp.pdf](https://www.emse.fr/~dutertre/documents/Cours_ET_1A_imp.pdf) >.
- [2] Teggat Ayoub. Etude comparative entre la commande vectorielle à flux orienté et la commande directe du couple de la machine asynchrone. Mémoire de master en électronique spécialité Instrumentation. Ouargla. Université Kasdi Merbah Ouargla. Promotion 2016. 53 Pages.
- [3] : [https://les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/et\\_ch7-msync.pdf](https://les-electroniciens.com/sites/default/files/cours/et_ch7-msync.pdf).
- [4] : <https://www.abcclim.net/moteur-asynchrone-triphas.html>.
- [5] : Athmane BIR Thème Démarrages et Protection des Moteurs Asynchrones Triphasés Mémoire de Fin d'Études MASTER PROFESSIONNEL UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU 28 septembre 2016.
- [6] : hadibi ali thème <commande directe du couple du moteur asynchrone -apport de la logique floue- > mémoire master université de Msila année : 2013/2014.
- [7]: benselhoub nadjat thème <commande par mode glissant appliquée a la machine asynchrone> .mémoire master génie électrique université de Msila année : juin 2012.
- [8] : heodor.W, Gilbert.S, « Electrotechnique » livre, 3ème édition, 1999.
- [9] : Conception optimale technico-économique d'un moteur asynchrone triphasé a double cage, Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou 2008-2009.
- [10] : Calcul d'un moteur asynchrone a rendement élevé, Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi-Ouzou 2008-2009.
- [11] : OUZEDDAM Hakim -SEKHRI Farés thème Etude de deux moteurs asynchrones commandés par un seul variateur de vitesse dans la machine Robopack au sein de l'entreprise SARL Ayris, Akbou Mémoire de Fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique Université A. MIRA-BEJAIA année 2017/2018.
- [12] : < [https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_asynchrone#Applications](https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone#Applications) >.
- [13] : présenté par - BOUBAAYA Hassen - KHAREF Hocine thème Caractérisation des paramètres de combustion d'un four industriel : cas de cimenterie de Hammam Dhalaa à M'sila THESE Présentée pour l'obtention du grade Master académique UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA Année Universitaire 2016-2017.
- [14] : présenté par ALHAJJAJI Malek, BOUBEKER Brahim, IDIRI Mohamed, ELJOURANI Safia, ZAMMA Abdellah<<Développement d'une nouvelle solution de maintenance préventive dans l'industrie du ciment>> : Laboratoire d'Ingénierie et Matériaux (LIMAT), Faculté des sciences Ben M'Sik, Casablanca, Maroc.

- [15] : présenté par HASNAOUI Hassen & SAHNOUN Brahim thème Utilisation de la logique floue pour l'optimisation d'un système de production du ciment au sein de la SCMI Mémoire de Master Université SAAD DAHLAB de BLIDA Année Universitaire 2016-2017.
- [16] : présenté par ZERMANE Hanane thème Télécontrôle et Techniques d'IA pour un Système de Conduite à Distance. THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES UNIVERSITE BATNA 2. Année 2017.
- [17] : Présenté par ALLALI Ahmed Zaki, ALLAM Abdelaziz thème Commande et supervision de la trémie d'alimentation d'un four de cuisson de clinker par un contrôleur flou sous Fuzzy control++ de Siemens. Mémoire de Master UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES juin 2017.
- [18] : Hanane Zermame, L. Hayet Mouss, Automatisation et contrôle flou d'un système de production, 1 ère Ecole d'automne sur le Génie Industriel et ses Applications (ASIEA 2014), Oran, Algérie, 17 – 20 Novembre 2014.
- [19] : Giancoli D.C « Electrotechnique, Wildi, Sybille », 4 eme Editions, paris, 2005.
- [20] : Bernard SCHNEUDER et Alain BEURET «L'électricité au service des machines », Y-verdon –les –Bains -2006.
- [21] : Claude CHEVASSU, «MACHINES ÉLECTRIQUES Cours et Problèmes»,2012.
- [22]: Frank J. Bartos, «AC Drives Stay Vital for the 21st Century », Control Engineering, ReedBusiness Information, 1er septembre 2004.
- [23] : Fennouch Djamel, Rahmouni Yacine. Etude et amélioration d'une chaîne de transport de brique de lait (convoyeur) au niveau de la SARL Tchîn Lait de bejaia. Master en électromécanique. Bejaia. Université Abderrahmane Mira de bejaia. Promotion 2007. 65 Pages.
- [24] : D. Bareille et J.P. Daunis Électrotechnique : Transformateur et machines tournantes. Édition DUNOD, Paris 2006.
- [25] : Manuel d'utilisation «Danfoss VLT 2800».année 18/01/2007.
- [26] : SCHNEIDER ELECTRIC, « Guide de l'installation électrique », (2010).

## L'annexe A

Puissance apparente kVA	In (A)	
	230 V	400 V
100	244	141
160	390	225
250	609	352
315	767	444
400	974	563
500	1218	704
630	1535	887
800	1949	1127
1000	2436	1408
1250	3045	1760
1600	3898	2253
2000	4872	2816
2500	6090	3520
3150	7673	4436

Tableau N°1 : Puissances apparentes normalisées des transformateurs MT/BT triphasés et intensités nominales correspondantes.

## Transformateurs immergés dans un diélectrique liquide

$S_n$ kVA	50	100	160	250	400	630	800	1000	1250	1600	2000	2500
$U_{cc(1)}$ %	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6	6
$I_n(2)$ A	72	144	231	361	577	909	1155	1443	1804	2309	2887	3608
$R_t$ mΩ	43,7	21,9	13,7	8,7	5,5	3,5	4,1	3,3	2,6	2,1	1,6	1,3
$X_t$ mΩ	134,1	67	41,9	26,8	16,8	10,6	12,6	10	8,1	6,3	5	4
$I_{cs(2)}$ kA	1,8	3,6	5,8	9,0	14,3	22,7	19,1	24,1	29,8	38,2	48,3	60,3
Disjoncteur	T1B160 T2N160 T4N250	T1B160 T2N160 T4N250	T3N250 T4N250	T5N400	T5N630	E1B10	E1B12	E2B16	E2B20	E3N25	E3N32	E4S40

Tableau N°2 : Caractéristiques des transformateurs MT/BT