

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la A Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## **Mémoire de Fin d'Etudes De MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

**Spécialité : ENTRAINEMENTS ELECTRIQUES**

*Présenté par*

**OULD OUELHADJ  
AZZOUT**

**Assem  
Karim**

Thème

# **Commande d'un moteur asynchrone destiné a l'entraînement d'une électropompe**

Mémoire soutenu publiquement le 29 09 2014 devant le jury composé de :

<b>M<sup>r</sup> S.H OULD OUALI</b>	maitre de conférence classe B,	UMMTO,	Président
<b>M<sup>r</sup> Farid HOCINI</b>	Maitre de conférence classe B	UMMTO,	Promoteur
<b>M<sup>r</sup> Ali BOUHEDDA</b>	Doctorant	UMMTO,	Co-promoteur
<b>M<sup>r</sup> S.H. OULD OUALI</b>	Maitre de conférences classe B	UMMTO,	Examineur
<b>M<sup>r</sup> Ahmed NAIT OUSLIMANE</b>	Maitre-assistant classe B	UMMTO,	Examineur

# Remerciement

# *Remerciement*

*Au terme de ce travail,*

*Nous tenons, en premier lieu à remercier le bon dieu pour le courage et la patience qu'il nous a donné afin de mener ce modeste travail à terme.*

*Nous remercions vivement notre promoteur Monsieur F. HOCINI qui a suivi ce travail, pour son aide, sa rigueur dans la qualité du travail effectué et ses orientations pédagogiques dans l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous n'oublions pas aussi de remercier monsieur A.BOUHADA d'avoir consacré son temps pour nous aider.*

*Nos remerciements vont également aux membres de jury, qui nous font vraiment l'honneur de juger notre travail.*

*Un grand merci à nos familles, plus particulièrement à nos parents, pour nous avoir soutenus et aidés tout au long de nos études.*

*Merci à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, directement ou indirectement, continue ou ponctuelle, à l'achèvement de ce travail*

# Dédicaces

# Liste des symboles

### Symboles utilisés

$v_{as}, v_{bs}, v_{cs}$  : tensions statoriques triphasées

$i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  : courants statoriques triphasées

$i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$  : Courants rotoriques triphasées

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$  : flux statoriques diphasées dans le repère tournant (d, q)

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$  : flux rotoriques diphasées dans le repère tournant (d, q)

$v_{sd}, v_{sq}$  : tensions statoriques diphasées dans le repère tournant (d, q)

$v_{rd}, v_{rq}$  : tensions rotoriques diphasées dans le repère tournant (d, q)

$i_{sd}, i_{sq}$  : courants statoriques diphasées dans le repère tournant (d, q)

$i_{rd}, i_{rq}$  : courants rotoriques diphasées dans le repère tournant (d, q)

$R_s, R_r$  : Résistances statorique et rotorique

$L_s, L_r, L_m$  : inductances cycliques statorique, rotorique, et mutuelle

$M_{sr}$  : inductance mutuelle entre stator et rotor

### Notations utilisées

J : moment d'inertie

P : nombre de paires de pôles

$\theta_s$  : angle de rotation du champ statorique tournant (angle entre le stator et l'axe d)

$\theta$  : angle entre le stator et le rotor

$\theta_r$  : angle de glissement (angle entre le rotor et l'axe d)

$\Omega$  : vitesse mécanique de rotation du rotor

$\omega$  : pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation W

$\omega_s$  : pulsation électrique statorique

$\omega_r$  : pulsation électrique rotorique ( $\omega - \omega_s$ )

g : glissement

$\sigma$  : coefficient de dispersion ou (de Blondel)

Cr : couple résistant incluant les frottements et le couple de charge

Cem: couple électromagnétique

$f_v$ : coefficient de frottements visqueux ;

## Liste des symboles

---

P : opérateur de Laplace (dérivée)

### **Acronymes utilisés**

MAS : Machine asynchrone

IFOC : Indirect Field Oriented Control

MLI : Modulation de Largeur d'impulsion

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor

PI : Proportionnel Intégral

# Sommaire

# Sommaire

---

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I _____ généralités sur les moteurs asynchrones triphasés.</b>	
I.1. INTRODUCTION .....	2
I.2. HISTORIQUE .....	2
I.3. Définition et description.....	3
I.4. Constitution de la machine asynchrone .....	3
I.4.1. Le stator.....	3
I.4.2. L'entrefer .....	3
I.4.3. Le rotor.....	4
I.4.4. Les organes mécaniques.....	5
I.5. Bobinage de la machine asynchrone.....	6
I.5.1. Isolation du bobinage.....	6
I.5.2. Classes d'isolations thermiques.....	7
I.6. Symboles .....	7
I.7. La Fonction d'un moteur asynchrone.....	7
I.8. La plaque signalétique d'un moteur asynchrone.....	7
I.9. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.....	8
I.10. Paramètres .....	10
I.11. Les types de démarrage d'un moteur asynchrone .....	12
I.11.1. Démarrage direct (rotor à cage d'écureuil) .....	12
I.11.2. Démarrage étoile-triangle (rotor à cage d'écureuil) .....	14
I.11.4. Démarrage par auto transformateur (rotor à cage d'écureuil) .....	16
I.11.4. a) premier temps .....	18
I.11.4. b) deuxième temps .....	18
I.11.4. C) troisième temps .....	18
I.11.6. Les démarreurs électroniques (SOFT STARTER) .....	18
I.11.7 : Tableau de comparaison des différents démarrages .....	19
I.12. Freinages des moteurs asynchrones .....	21
I.12.1. Freinage électromécanique .....	22
I.12.2. Freinage électronique .....	23
I.12.2.a) Freinage par contre courant .....	24
I.12.2.b) Freinage par injection de courant continu .....	24

# Sommaire

---

I.13. Bilan des puissances.....	25
I.13.1. La puissance électrique absorbée $P_a$ .....	26
I.13.2. Les pertes par effet joule au stator $P_{JS}$ .....	26
I.13.3. Les pertes fer au stator $P_{fs}$ .....	26
I.13.4. La puissance transmise $P_{tr}$ .....	27
I.13.5. Les pertes par effet joule au rotor $P_{jr}$ .....	27
I.13.6. Les pertes fer au rotor $P_{fr}$ .....	27
I.13.7. Le couple électromagnétique $C_{em}$ .....	27
I.13.8. La puissance mécanique $P_{mec}$ .....	27
I.13.9. les pertes mécaniques $P_{mec}$ .....	28
I.13.10. La puissance utile $P_u$ .....	28
I.14. Conclusion.....	28
<b>Chapitres II</b> .....	<b>fonctionnement et démarrage des PCI.</b>
II.1. Introduction.....	29
II.2. Les pompes roto-dynamiques.....	29
II.2.1 Principe de fonctionnement des pompes centrifuges.....	29
II.2.2. Utilisation.....	30
II.2.3. Amorçage.....	30
II.2.4. Réglage du débit.....	30
II.2.5. types de pompes centrifuges.....	31
II.3. Les pompes centrifuges immergées (PCI).....	31
II.3.1. définition d'une (PCI).....	31
II.3.2. Vue Éclatée d'un Étage.....	32
II.3.3. Principe de Fonctionnement.....	33
II.3.3. Caractéristiques débit-vitesse.....	34
II.3.4. Caractéristiques couple-vitesse.....	35
II.3.5. Caractéristiques débit-hauteur.....	36
II.4. moteur d'entraînement.....	39
II.5. Démarrage du Moteur d'entraînement.....	40
II.5.1. Démarrage direct (DOL).....	40
II.5.2. Démarrage à Tension Réduite.....	42
II.5.1.a). Inducteur Série.....	45
II.5.1.b). Transformateur d'Impédance Elevée.....	45

# Sommaire

---

II.5.1.c).Autotransformateur.....	46
II.5.1.d). Semi –conducteurs.....	46
II.5.2.Démarrage à Fréquence Variable.....	47
II.6.CONCLUSION.....	5

1

## **Chapitre III** \_\_\_\_\_ **modélisation du moteur asynchrone.**

III.1 Introduction.....	52
III.2. Hypothèses simplificatrices.....	52
III.3. Convention de signe.....	53
III.4. Définition des angles.....	53
III.5. Equations de la machine asynchrone triphasée.....	54
III.5-1 Equations électriques .....	54
III.5-2 Equation des flux.....	55
III.5.3.Equation mécanique .....	56
III.5.4.Mise en équation de la machine asynchrone dans le système d'axes (d,q) .....	56
III.6.Transformation de Park.....	56
III.6.1 Modèle du moteur asynchrone exprimé dans le repère (dq).....	58
III.6.1.a) Equations électriques.....	58
III.6.1.b) Equations des flux.....	60
III.6.1.c) Schéma équivalent de la machine asynchrone dans le repère dq.....	62
III.6.1.d) Expression du couple électromagnétique dans le plan dq.....	62
III.7 Choix du référentiel de travail.....	63
III.7.1 Référentiel lié au stator.....	63
III.7.2 Référentiel lié au rotor.....	63
III.7.3 Référentiel lié au champ tournant.....	64
III.8. Simulation et interprétation .....	66
III.8.2.Déclaration des Paramètres .....	66
III.8. 3.model sur simulink.....	68
III.8.4.les résultats de la simulation d'un Démarrage à vide ( $C_r=0$ N .m) .....	69
III.8.5.les résultats de la simulation d'un Démarrage à charge ( $C_r=15$ N.m) .....	71
III.8.5.a) application une charge de 15 (N.m) à l' instant ( $t=1S$ ) .....	71
III.8.5.b) application une charge de 15 (N.m) à l' instant ( $t=0S$ ) .....	77
III.8.6 : Interprétation des résultats.....	77

# Sommaire

---

III.9. Conclusion.....78

## **Chapitre IV \_\_\_\_\_ commande vectorielle d'une PCI.**

IV.1.Introduction .....78

IV.2.Historique .....78

IV. 3.Objectif De La Commande Vectorielle .....78

IV.4.Définition .....79

IV.5. Les classes de la commande vectorielle .....79

IV.6.La Comparaison Entre La Commande Vectorielle Et La Commande Scalaire .....80

IV.7.Intérêt De La Commande Vectorielle.....80

IV.8.Inconvénient De La Commande vectorielle .....80

IV.9. Principe De La Commande Vectorielle .....80

IV.9.1.Principe du découplage .....80

IV.9.2.Principe de la commande par orientation du flux.....81

IV.9.2.a) description .....81

IV.9.2.b) principe de la commande .....81

IV.9.2.b) Structure d'une alimentation par orientation du flux.....83

IV.10. commande, à l'aide des régulateurs PI .....86

IV.11.Résultat de simulation sur Matlab simulink Pour  $C_r=15$  (N.m) a l'instant ( $t = 1s$ ).....87

IV.12.Résultat de simulation sur Matlab simulink Pour  $C_r=15$  (N.m) a l'instant ( $t = 0s$ ).....90

IV.12.conclusion.....91

Conclusion générale .....93

.

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

---

Depuis son invention par Nikola Tesla à la fin de 19<sup>ème</sup> siècle, quand il découvrit les champs magnétiques tournants engendrés par un système de courant polyphasés, la machine asynchrone (MAS) est la machine électrique la plus utilisée principalement dans les applications industrielles. Ses principaux avantages résident dans l'absence de bobinage rotorique (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.

La principale difficulté qu'on rencontre dans la commande de cette machine réside dans l'absence totale du découplage entre le flux et le couple. Ces deux grandeurs dépendent toutes du courant statorique. Pour se faire, ce découplage entre le couple et le flux, la commande classique sert à contrôler : le couple par le glissement et le flux par le rapport tension/fréquence  $U/f$  (constant). Mais, à cause de manque d'informations sur le rapport  $U/f$ , ce type de commande a montré ses limites en matière de qualité de ses performances. En ce temps, le principe de découplage n'a pas été encore développé, l'apparition d'une nouvelle technique dite "commande vectorielle" ou "commande par flux orienté" a rendu la commande de la machine asynchrone possible comme les machine à courant continu.

Le travail présenté dans ce mémoire se situe dans le cadre des objectifs suivants :

- la modélisation d'une machine asynchrone destinée à l'entraînement d'une pompe centrifuge immergée.
- La simulation de cette machine à l'aide de MATLAB/SIMULINK.
- La réalisation et la simulation de sa commande vectorielle.

Notre travail est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre : il contient presque toutes les généralités sur la machine asynchrone.

Le deuxième chapitre traite les pompes centrifuges immergées.

Le troisième chapitre, c'est la mise en équations de la machine asynchrone dans les différents référentiels en leurs appliquant la transformation de Park. Nous présentons aussi dans ce chapitre la simulation de la machine asynchrone à vide et en charge sous MATLAB/SIMULINK, et l'interprétation des résultats obtenus.

Le dernier chapitre est consacré à la commande vectorielle et sa simulation et l'interprétation de ses résultats obtenus.

A la fin, notre travail est clôturé par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.



**Chapitre I**

**Généralités sur les moteurs  
asynchrones triphasés**

**I.1. INTRODUCTION**

Le moteur asynchrone triphasé est largement utilisé dans l'industrie, sa simplicité de construction en fait un matériel très fiable et qui demande peu d'entretien. Il est constitué d'une partie fixe, le stator qui comporte le bobinage, et d'une partie rotative, le rotor qui est bobiné en cage d'écureuil. Les circuits magnétiques du rotor et du stator sont constitués d'un empilage de fines tôles métalliques pour éviter la circulation de courants de Foucault. [1]

**I.2. HISTORIQUE**

La paternité de la machine asynchrone est controversée. Elle pourrait être attribuée à trois inventeurs : en 1887, NIKOLA TESLA dépose un brevet sur la machine asynchrone, puis en mai de l'année suivante cinq autres brevets. Pendant la même période GALILO FERRARIS publie des traités sur les machines tournantes, avec une expérimentation en 1885, puis une théorie sur le moteur asynchrone en avril 1888. En 1889, MICHAÏL OSSIPOWITSCH DOLIWO-DOBROWOSKI, électricien allemand d'origine russe, invente le premier moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil qui sera construit industriellement à partir de 1891.

Du fait de sa simplicité de construction, d'utilisation et d'entretien, de sa robustesse et son faible prix de revient, la machine asynchrone est aujourd'hui très couramment utilisée comme moteur dans une gamme de puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs milliers de kilowatts.

Quand la machine asynchrone est alimentée par un réseau à fréquence fixe, il est difficile de faire varier sa vitesse. En outre, au démarrage, le couple est faible et le courant appelé est très élevé. Deux solutions historiques ont résolu ce dernier problème : le rotor à encoches profondes et le rotor à double cage découvert en 1912 par Paul Boucherot. Grâce aux progrès de l'électronique de puissance, l'alimentation par un onduleur à fréquence variable, permet maintenant de démarrer la machine convenablement et de la faire fonctionner avec une vitesse réglable dans une large plage. [2]

### **I.3. Définition et description**

Le moteur asynchrone est une machine tournante aussi appelée moteur à induction : il fonctionne avec du courant alternatif. Sa particularité est de fonctionner avec un induit en court-circuit, sur lequel il n'y a pas donc pas besoin de connexion électrique.

Ceci permet de s'affranchir des problèmes liés aux collecteurs et aux balais, rencontrés dans le moteur à courant continu par exemple.

Ce moteur peut, selon sa construction, être relié par son circuit inducteur à un réseau électrique alternatif monophasé ou polyphasé. Nous étudierons pour notre part le cas où le moteur est alimenté par un réseau triphasé. En effet, les moteurs triphasés présentent pour une masse donnée des performances jusqu'à 50 % supérieures à leurs homologues monophasés.

Le moteur asynchrone offre le meilleur rapport-qualité prix parce qu'il est facile à construire et parce qu'il est performant. Qui plus est, l'entretien est plus simple que dans le cas d'un moteur à courant continu, justement parce qu'il n'y a ni collecteur, ni balais. [3]

### **I.4. Constitution de la machine asynchrone**

La machine asynchrone est constituée des principaux éléments suivants :

- Le stator
- L'entrefer
- Le rotor
- Les organes mécaniques

#### **I.4.1. Le stator**

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces en acier au silicium de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur, ces tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Les tôles sont munies d'encoches dans lesquelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant. Le feuilletage du circuit magnétique réduit les pertes par courants de Foucault.

#### **I.4.2. L'entrefer**

C'est l'intervalle d'air entre le stator et le rotor, son épaisseur est de l'ordre de dixième de millimètre, il varie entre 0.2 et 1.2 millimètre.

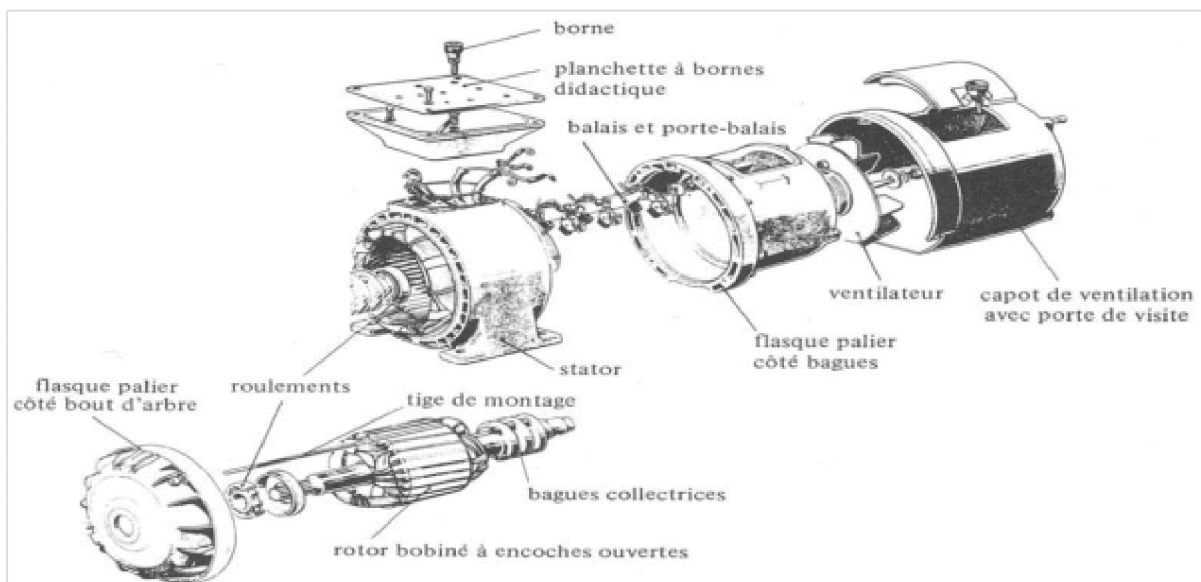
### I.4.3. Le rotor

C'est l'élément mobile du moteur, son circuit magnétique est similaire à celui du stator, il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur et il contient des encoches destinées à loger l'enroulement.

Il existe deux types de moteurs asynchrones, qui se distinguent par la forme de leur rotor qui est soit bobiné ou à cage, dans tous les cas le stator reste au moins dans son principe, le même.[4]

#### ➤ Rotor bobiné

Les tôles de ce rotor sont munies d'encoches où sont placés des conducteurs formant un bobinage de structure généralement semblable à celle des enroulements statoriques.



**Figure I.1 :** Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à bagues.

Dans le cas très fréquent où le bobinage du rotor est triphasé, trois bagues et trois balais sont prévus pour accéder à ces enroulements. Ce dispositif permet de modifier certaines caractéristiques électriques du circuit rotorique et par là, les propriétés électromagnétiques du moteur asynchrone.

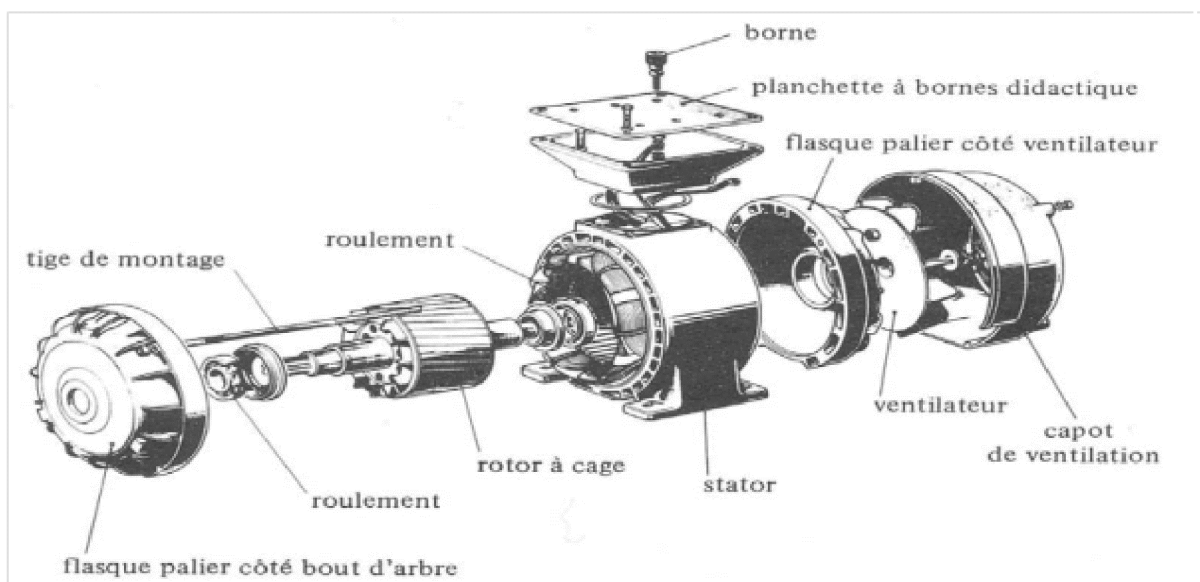
Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et/ou nombreux. [4]

**➤ Rotor à cage**

Un rotor à cage d'écureuil porte un système de barres conductrices faites en cuivre, en bronze ou en aluminium logées dans un empilement de tôles. Les extrémités de ces barres sont réunies par deux couronnes également conductrices.

Ce type de moteur est plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné et par conséquent d'un prix de revient inférieur et à une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a au démarrage de mauvaises performances, courant élevé et faible couple. C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cages, rotor à double cage et rotor à encoches profondes.



**Figure. I-2.** Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à cage.

**I.4.4. Les organes mécaniques**

Le moteur comporte une carcasse qui reçoit de chaque côté un flasque sur lequel le rotor sera positionné grâce à des roulements qui permettent la rotation de ce dernier, un ventilateur placé en bout d'arbre pour le refroidissement de la machine et un bâti qui maintient les différents sous ensembles.

### I.5. Bobinage de la machine asynchrone

On peut effectuer le bobinage d'une machine asynchrone de plusieurs façons, la disposition des bobines dans les encoches différencie ces types d'enroulements d'où on trouve habituellement trois types, l'enroulement imbriqué, concentrique et ondulé. Chaque type présente des avantages dans certaines applications.

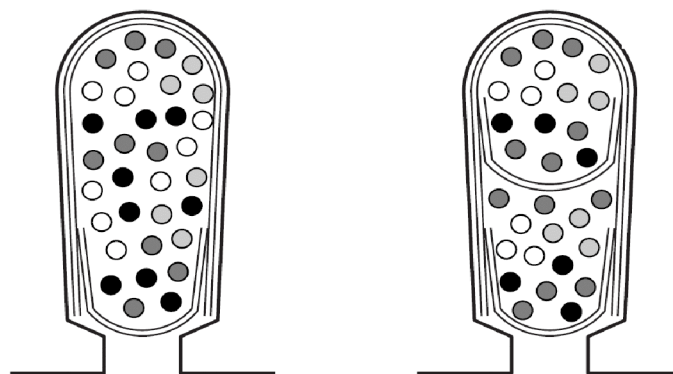
L'enroulement du stator peut être à une seule ou à deux couches, ce dernier nous permet de raccourcir le pas d'enroulement.

Le bobinage statorique peut se décomposer en deux parties, les conducteurs d'encoches et les têtes de bobines. Les conducteurs d'encoches permettent de créer dans l'entrefer le champ magnétique à l'origine de la conversion électromagnétique. Les têtes de bobines permettent, la fermeture des courants en organisant la circulation judicieuse des courants d'un conducteur d'encoche à l'autre ; l'objectif est d'obtenir à la surface de l'entrefer une distribution de courant la plus sinusoïdale possible, afin de limiter les ondulations du couple électromagnétique.[4]

#### I.5.1. Isolation du bobinage

On doit isoler les bobines par rapport à la masse, c'est-à-dire l'empilage de tôles magnétiques, de même qu'on doit isoler entre elles les bobines appartenant à des phases différentes.

Le matériau isolant utilisé est bien sûr sélectionné en fonction de ses qualités diélectriques, mécaniques et thermiques.



**Figure. I-3.** Schématisation de l'isolation d'encoches.

### I.5.2. Classes d'isolations thermiques

La tâche la plus difficile et la plus importante est d'assurer la bonne tenue de l'isolation des enroulements, qui se dégrade pour des températures relativement peu élevées. Pour cette raison la charge admissible d'une machine est déterminée tout d'abord par la température admissible des isolants utilisés.

Les matériaux isolants utilisés dans la construction des machines électriques se divisent selon leur tenue à la chaleur en classes Y, A, E, B, F, H et C qui correspondent à des températures maximales de 90°C, 105°C, 120°C, 130°C, 155°C, 180°C, et supérieure à 180°C.

### I.6. Symboles [5] :

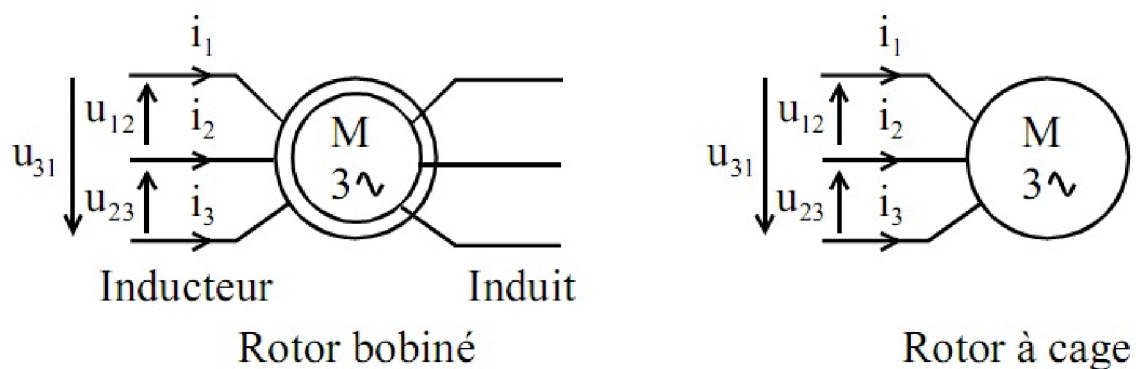


Figure I.4 : Symboles électriques du moteur asynchrone à rotor bobiné et à cage d'écureuil.

### I.7. La Fonction d'un moteur asynchrone

Le moteur électrique asynchrone a pour rôle de TRANSFORMER l'énergie électrique apportée par le courant alternatif en énergie mécanique de rotation. [4]

### I.8. La plaque signalétique d'un moteur asynchrone

La plaque signalétique d'un moteur asynchrone (moteur électrique) est la carte d'identité du moteur délivrée et **certifiée** par le constructeur.

Elle contient donc **les caractéristiques nominales** électriques du moteur comme le montre l'image suivante.

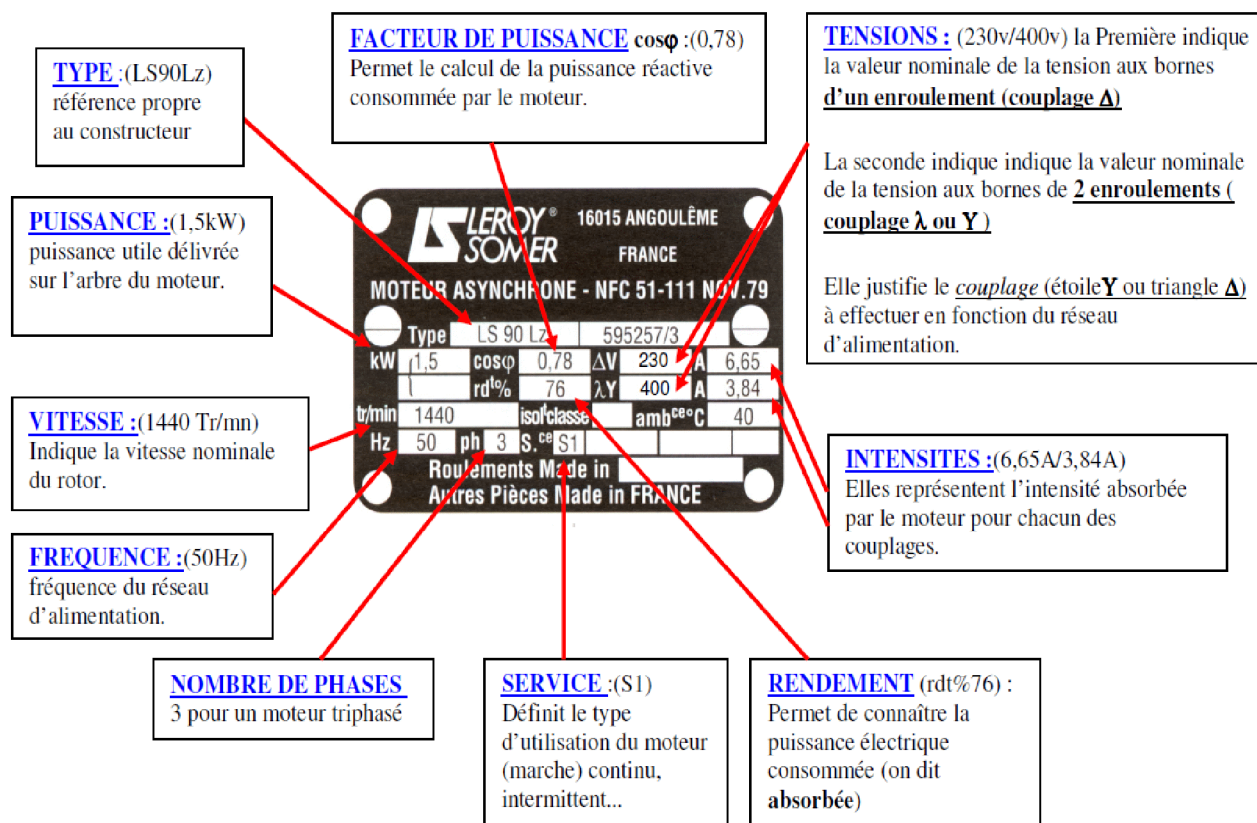
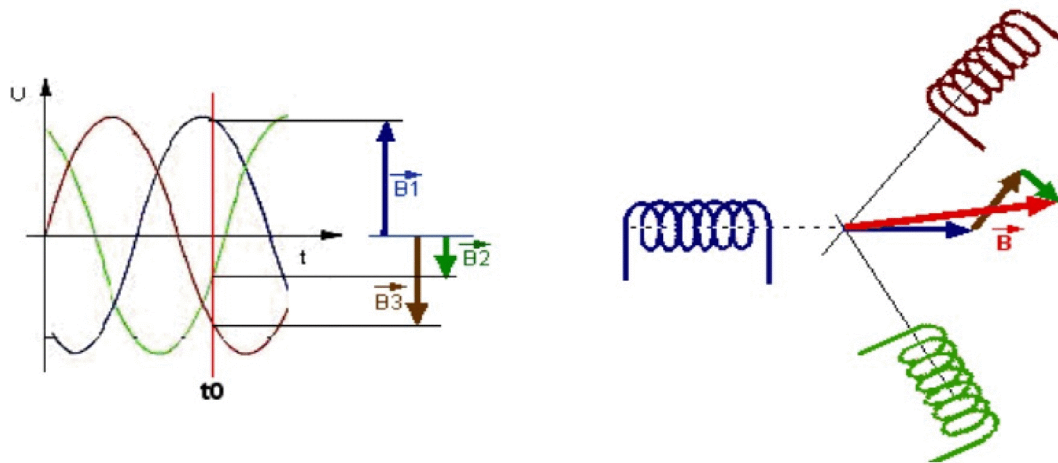


Figure I.5 : Plaque signalétique d'un moteur électrique asynchrone

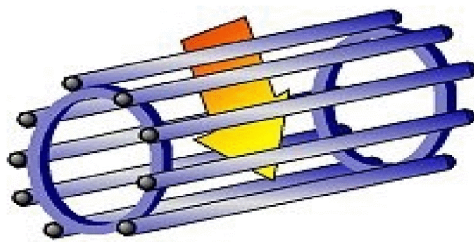
### I.9. Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone

Les trois bobines sont disposées dans le stator à 120° les unes des autres, trois champs magnétiques sont ainsi créés

Compte-tenu de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois champs sont déphasés (chacun à son tour passe par un maximum). Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant soit 50 tr/s = 50Tr/s = 3000 tr/mn.



Le rotor est constitué de barres d'aluminium noyées dans un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leur extrémité par deux anneaux conducteurs et constituent une "cage d'écureuil".



Cette cage est en fait un bobinage à grosse section et très faible résistance.

Cette cage est balayée par le champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors traversés par des courants de Foucault induits. Des courants circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace qui en résultent exercent un couple sur le rotor. D'après la loi de Lenz les courants induits s'opposent par leurs effets à la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne alors dans le même sens que le champ mais avec une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme de ce dernier.

Le rotor ne peut pas tourner à la même vitesse que le champ magnétique, sinon la cage ne serait plus balayée par le champ tournant et il y aurait disparition des courants induits et donc des forces de Laplace et du couple moteur. Les deux fréquences de rotation ne peuvent donc pas être synchrones d'où le nom de moteur asynchrone. [1]

## I.10. Paramètres

## ➤ vitesse de synchronisme

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. Ce champ tourne à la même fréquence que les courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique désignée par  $n_s$  la vitesse de synchronisme, c'est-à-dire la fréquence de rotation du champ statorique dans la machine.

On désigne par  $n$  la **vitesse de rotation** de la machine.

La fréquence de synchronisme est toujours un sous multiple entier de la fréquence du secteur

- en 50 Hz c'est un sous multiple de 3000 tr/min soit : 3000 ; 1500 ; 1000 ; 750 ; etc.
- en 60 Hz c'est un sous multiple de 3600 tr/min, soit : 3600 ; 1800 ; 1200 ; 900 etc.

Soit  $p$  le nombre de paires de pôles de la machine et  $f$  la fréquence de l'alimentation.

On a :

## ➤ Le glissement

$$n_s = \frac{f}{p} \text{ tr/s} \quad (\text{I.1})$$

$$n_s = \frac{60f}{p} \text{ tr/min} \quad (\text{I.2})$$

Le glissement correspond à la différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique exprimée sous la forme d'un pourcentage de la vitesse de synchronisme

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{I.3})$$

Le glissement est toujours faible, de l'ordre de quelques pour-cent : 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.

➤ **Le couple :**

La force totale du moteur est la somme des forces qui s'exercent sur les conducteurs: on l'appelle couple du moteur. le terme « couple » désigne aussi un travail produisant la rotation d'un axe.

S'il y a une chose plus importante à retenir et à comprendre, c'est déjà que couple et puissance sont deux grandeurs intimement liées. La relation qui les unit est simple :

$$p = cw \quad (I.4)$$

Donc

$$c = \frac{p}{w} \quad (I.5)$$

Où  $w$  est la vitesse de rotation du moteur. P, C et  $w$  sont ici exprimées dans les unités " officielles ", à savoir le Watt, le Newton-mètre et le radian par seconde.

### **I.11. Les types de démarrage d'un moteur asynchrone :**

#### **I.11.1. Démarrage direct (rotor à cage d'écureuil) :**

Ce mode de démarrage consiste à brancher le moteur directement au réseau. Dans ce cas, il démarre sous caractéristique naturelle (tension nominale), ce qui provoque les pics de courant très élevés, courant de  $I_d=5$  à 8 fois le courant nominal( $I_n$ ).

Ce type est utilisé pour les moteurs de faible et moyenne puissance  $P_m \leq 1.5$  kW. [6]

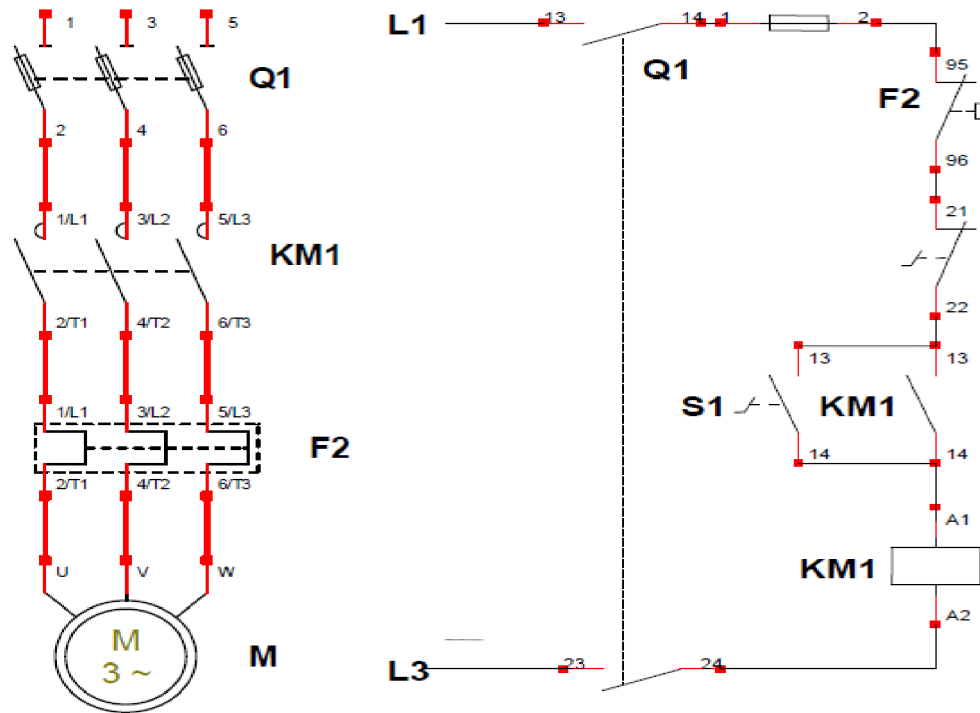


Figure I.6 : schéma de puissance et de commande de démarrage direct.

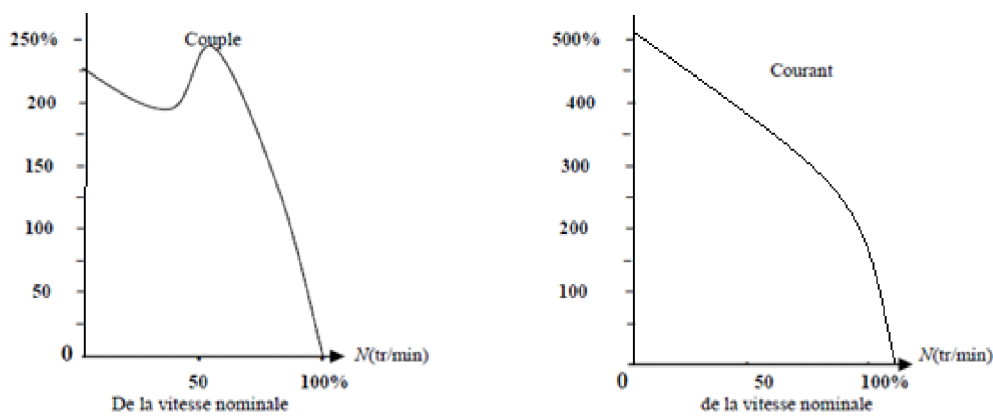


Figure I.7 : le rapport de couple et de courant en fonction de rapport de la vitesse  
Pour un démarrage direct.

➤ **Avantage de démarrage**

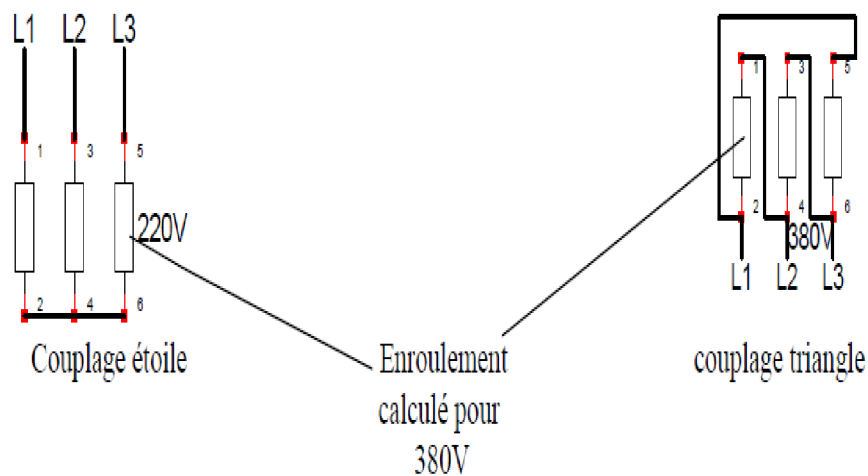
- Simplicité de l'appareillage.
- Démarrage rapide.
- Coût faible.
- Le couple de démarrage doit être élevé.

➤ **Inconvénient de démarrage direct**

- Courant de démarrage élevé, 5 à 7In.
- La puissance du moteur doit être faible par rapport à la puissance du réseau. (chute de tension trop importante).
- Démarrage brutale (problème mécanique et humains).

**I.11.2. Démarrage étoile-triangle (rotor à cage d'écureuil)**

Ce mode de démarrage n'est utilisable si les deux extrémités de chaque enroulement sont accessibles. De plus, il faut que le moteur soit compatible avec un couplage final triangle.



**Figure I.8 :** Branchement étoile et triangle

Lors du couplage étoile, chaque enroulement est alimenté sous une tension  $\sqrt{3}$  fois plus faible, de ce fait, le courant et le couple sont divisés par  $\sqrt{3}$ .

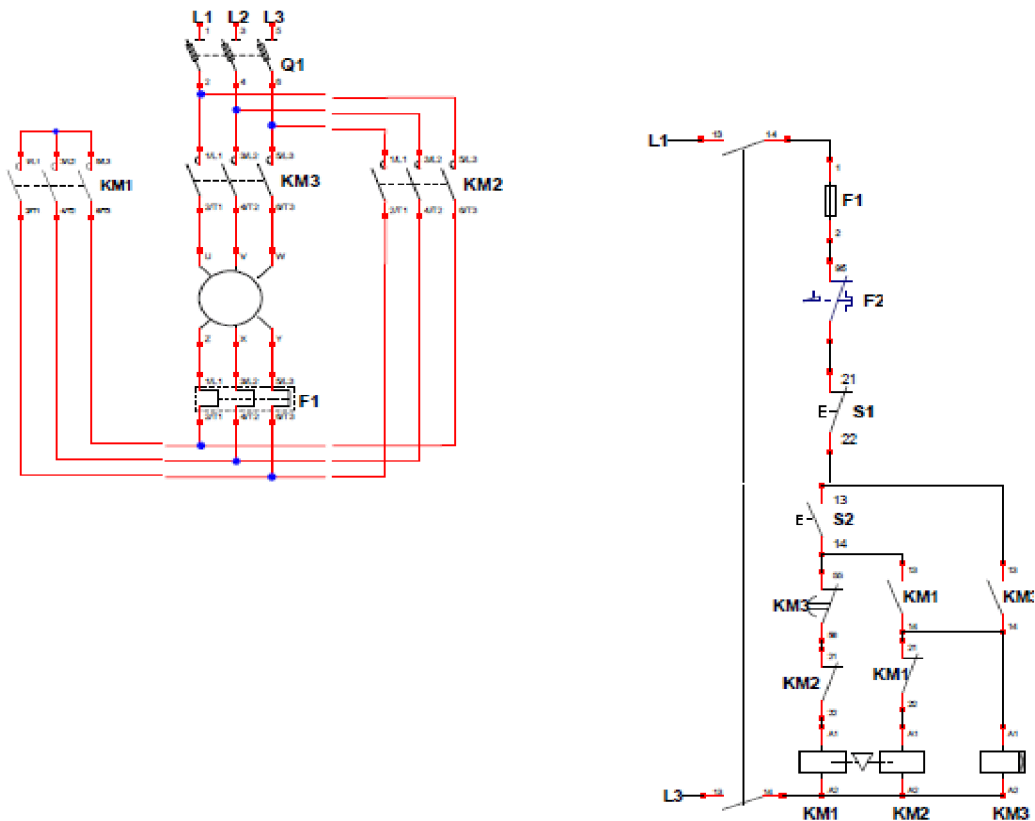


Figure I.9 : schéma de puissance et de commande de démarrage étoile-triangle.

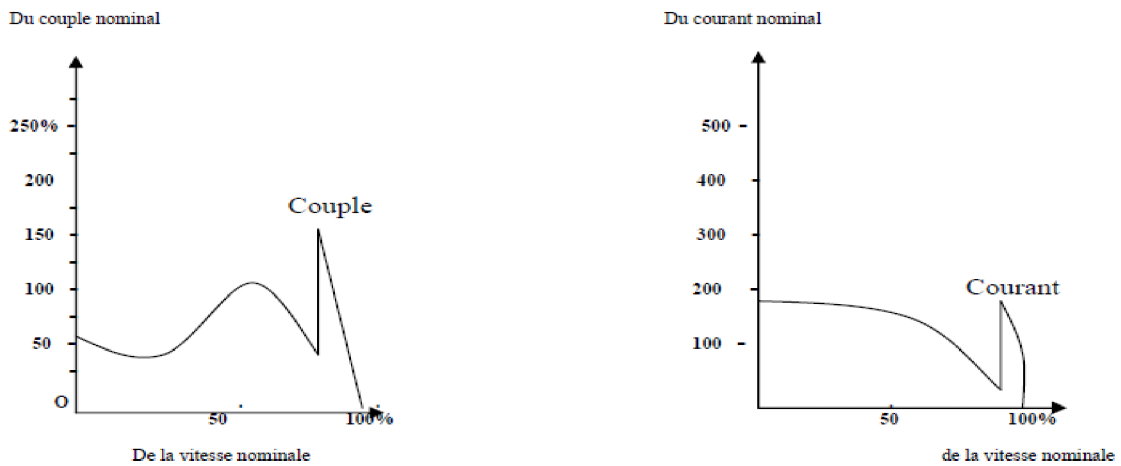


Figure I.10 : le rapport de couple et de courant en fonction de rapport de la vitesse  
Pour un démarrage étoile-triangle.

Lorsque les caractéristiques courant ou couple sont admissibles, on passe au couplage triangle. Le passage du couplage étoile au couplage triangle n'étant pas instantané, le courant est coupé pendant 30 à 50 ms environ. Cette coupure du courant provoque une démagnétisation du circuit magnétique.

Lors de la fermeture du contacteur triangle, une point de courant réapparaît brève mais importante (magnétisation du moteur).

- Avantage du démarrage étoile-triangle :
  - Courant du démarrage faible.
- Inconvénient du démarrage étoile-triangle :
  - Couple du démarrage faible.
  - Moteur 6 bornes.

Coupure d'alimentation au changement de couplage.

**I.11.3. Démarrage par des résistances statoriques (rotor à cage d'écureuil)**

Un autre moyen consiste à réduire la tension aux bornes, en introduisant une résistance en série sur chacune des phases du moteur. Les résistances peuvent être des résistances métalliques, munies d'un ou plusieurs crans que l'on court-circuite au fur et à mesure de la montée en vitesse, ou bien des résistances électrolytiques ; dans ces éléments, la variation de résistance est continue et obtenue soit par l'échauffement d'un électrolyte sous l'effet du passage du courant (la résistivité d'un électrolyte décroissant avec la température), soit par une variation commandée du niveau de l'électrolyte entre des électrodes. La valeur initiale de la résistance des appareils électrolytiques est fixée par la concentration du bain de l'électrolyte. [6]

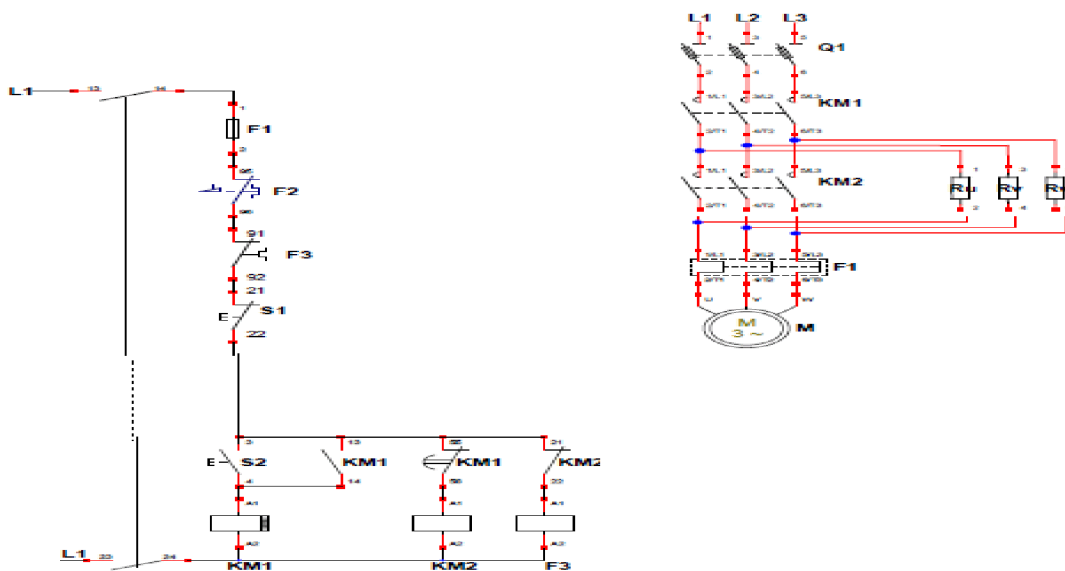
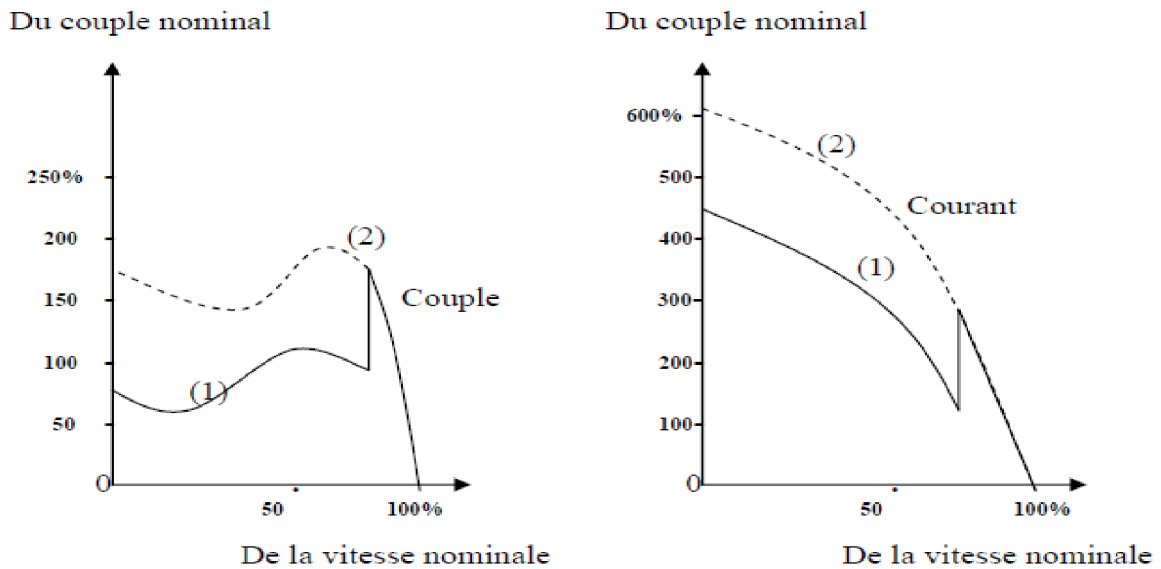


Figure I.11 : schéma de puissance et de commande de démarrage statorique.



**Figure I.12** : le rapport de couple et de courant en fonction de rapport de la vitesse  
 Pour un démarrage statorique.

En associant le réglage étoile-triangle et les résistances statorique, on aboutit à un système qui conserve la forte réduction du courant initial et qui réduit l'appel de courant consécutif à la remise en triangle des enroulements. Le démarrage se fait en trois temps :

Alimentation en étoile, alimentation en triangle avec insertion de résistances statoriques, puis mise en court-circuit de ces résistances.

➤ **Avantage du démarrage statoriques :**

- Pas de coupure d'alimentation pendant le démarrage.
- Il ya pas de risque de phénomènes transitoires, car l'élimination des résistances statoriques se fait sans l'interruption de l'alimentation.
- Possibilité de réglage des valeurs au démarrage.

➤ **Inconvénient du démarrage statoriques :**

- perte de puissance dans les résistances.
- Perte de couple important.
- le courant de démarrage est encore élevé.

**I.11.4. Démarrage par auto transformateur (rotor à cage d'écureuil)**

**I.11.4. a) premier temps**

L'auto transformatrice est d'abord couplée en étoile, puis le moteur est couplé au réseau à travers ses enroulements, le démarrage est réalisé sous une tension réduite qu'est en fonction du rapport de transformation. L'auto transformateur est choisi de façon à ce que la tension réduite soit la mieux adaptée (suffisante pour démarrer le moteur).

**I.11.4. b) deuxième temps :**

Avant de passer ou couplage plein charge, le couplage en étoile est ouvert, la fonction du bobinage constitue une inductance en série avec le moteur.

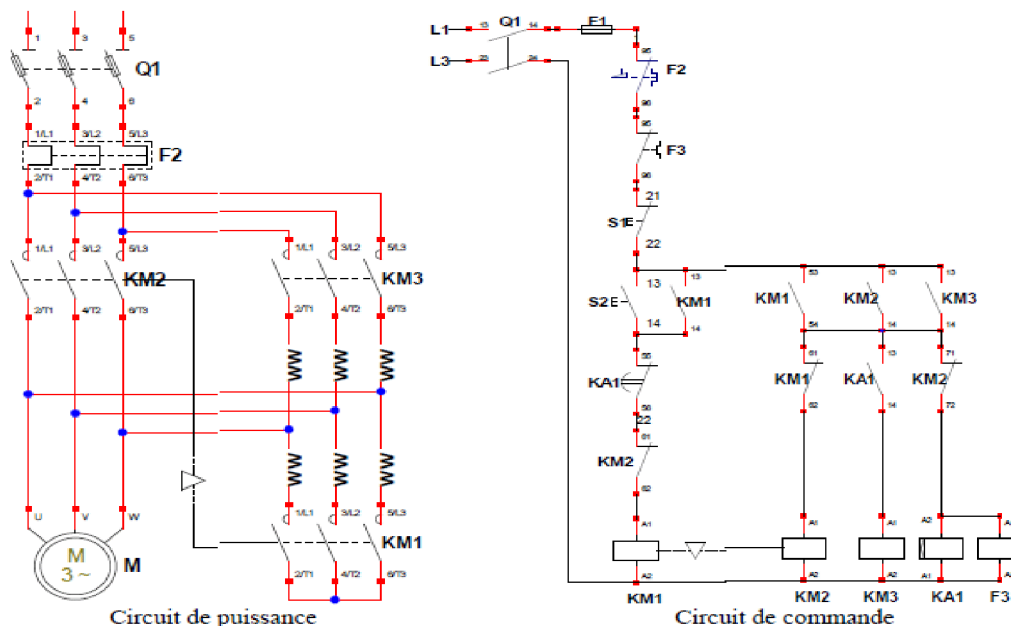
**I.11.4. C) troisième temps :**

Le couplage plain tension intervient après le deuxième temps, généralement très court, les inductances en services avec le moteur, sont court-circuitées puis l'autotransformateur est mis hors circuit.

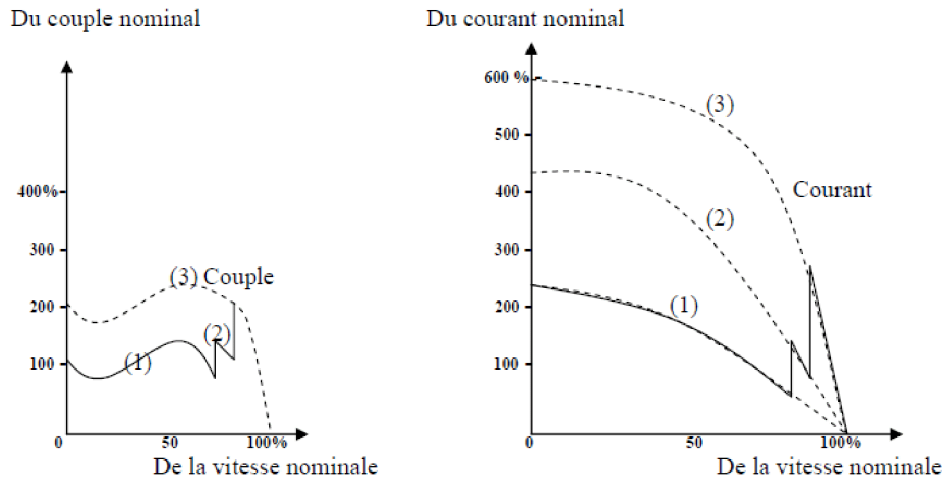
Le courant et le couple de démarrage varient dans la même proportion.  $I_d=1.7$  à  $4 I_n$

et  $C_d=0.5$  à  $0.85 C_n$ .

Ce mode de démarrage est généralement utilisé pour les moteurs asynchrone triphasés de puissance supérieur à 100 kW. [6]



**Figure I.13 :** schéma de puissance et de commande de démarrage par autotransformateur.



**Figure I.14 :** le rapport de couple et de courant en fonction de rapport de la vitesse  
Pour un démarrage autotransformateur.

- **Avantage de démarrage par autotransformateur :**
  - Ce démarrage s’effectue sans interruption du courant.
  - Permet un démarrage sous tension réduite.
  - Réduit les pics de courant au démarrage.
- **Inconvénient de démarrage par autotransformateur :**
  - Les phénomènes transitoires peuvent apparaître lors du couplage plein tension.
  - Prix élevé de l’autotransformateur.

**I.11.5. Démarrage rotorique (rotor bobiné en court circuit) :**

On limite le courant absorbé au stator en augmentant la résistance du circuit du rotor. Des résistances montées en série dans le circuit du rotor sont éliminées au fur et à mesure que le moteur prend de la vitesse.

On démarre en insérant toutes les résistances, puis on élimine progressivement les différents jeux de résistances. Dans notre cas, il y a 2 jeux de résistances, la pointe de courant est réduite par 4 et en même temps le couple de démarrage  $C_D = 1,5 \cdot C_N$ .

Ce démarrage est le plus souple et le meilleur au point de vue électrique. Par contre, le moteur à rotor bobiné est mécaniquement moins fiable et son prix en association au système de démarrage n'est compétitif que dans des applications particulières.

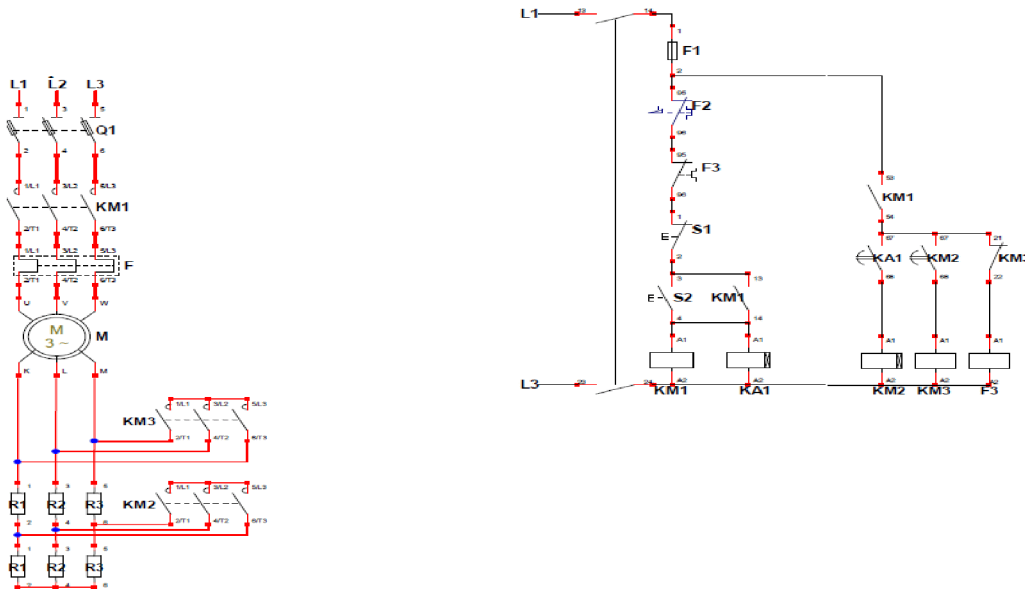


Figure I.15 : schéma de puissance et de commande de démarrage rotorique.

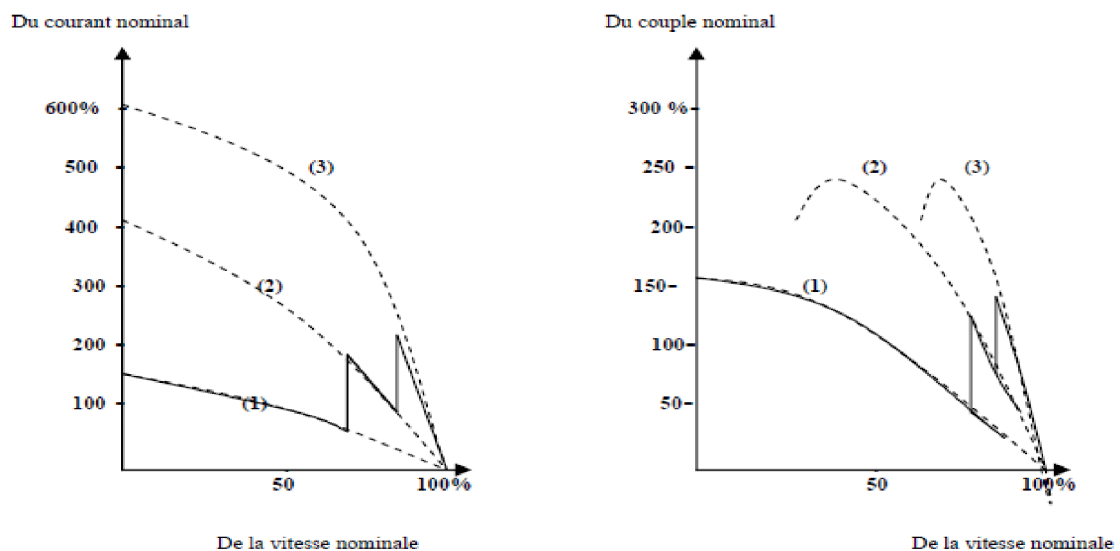


Figure I.16 : le rapport de couple et de courant en fonction de rapport de la vitesse  
Pour un démarrage rotorique.

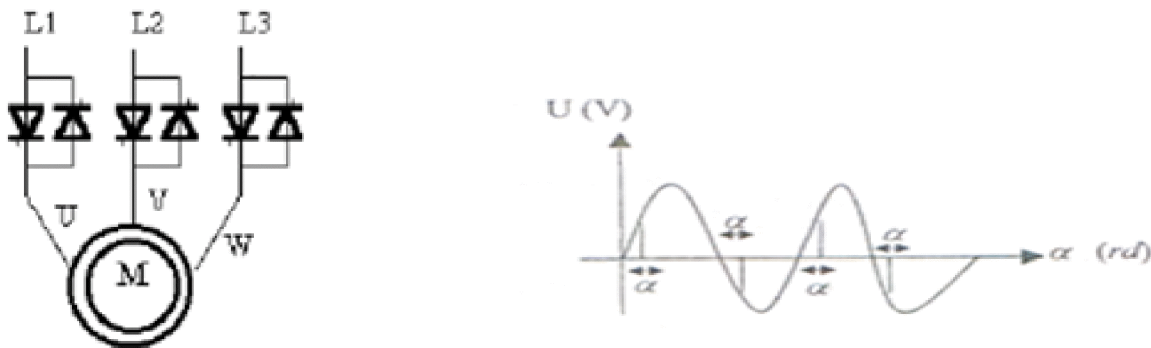
### I.11.6. Les démarreurs électroniques (SOFT STARTER)

Le démarrage du moteur asynchrone triphasé se fait par la montée progressive de la tension, ce qui permet la réduction du point de courant.

Ce type de démarrage est réalisé par l'intermédiaire d'un gradateur à thyristors à angle de phase montés tête-bêche deux par deux par chaque phase.

Le courant de démarrage est réglé entre 2 à 5  $I_n$ , ce qui donne un couple de démarrage réglable de 0.1 à 0.7  $C_m$

Il peut être court-circuité en fin de démarrage.



**Figure I.17** : schéma de démarrage électronique (SOFT STARTER).

➤ **Avantage de démarrage électronique :**

- Maîtrise des caractéristiques de fonctionnement.
- Protection thermique du moteur et du démarrage.
- Protection mécanique de la machine entraînée par la réduction du courant de démarrage.

➤ **Inconvénient de démarrage électronique :**

- Génère les perturbations.

I.11.7 : Tableau de comparaison des différents démarrages

Types de démarrage	Démarrage direct	Démarrage étoile triangle	Démarrage statorique	Démarrage par auto transformateur	Démarrage rotorique	Démarrage électronique
Courant de démarrage	100%	33%	50%	40 à 80%	70%	15 à 75%
Surcharge en ligne	4 à 8 I <sub>n</sub>	1,3 à 1,6 I <sub>n</sub>	4.5 I <sub>n</sub>	1,7 à 4 I <sub>n</sub>	<2,5 I <sub>n</sub>	
Couple en % de Cd	100%	33%	50%	40 à 80%		10 à 50% (50 à 100% en 100 ms)
Couple initiale au démarrage	0,6 à 1,5 C <sub>n</sub>	0,2 à 0,5 C <sub>n</sub>	0,6 à 0,85 C <sub>n</sub>	0,4 à 0,85 C <sub>n</sub>	0,4 à 0,85 C <sub>n</sub>	<2,5 C <sub>n</sub>
avantages	- démarreur simple et économique -couple au démarrage important	-économiques -bon rapport couple/courant	-possibilités de réglages des valeurs au démarrage	-bon rapport couple/courant - possibilités de réglages des valeurs au démarrage	-très bon rapport couple/courant -possibilité de réglage des valeurs au démarrage	-Démarrage sans à coup -montée progressive en vitesse -limitation de l'appel de courant au démarrage
inconvénients	-pointe de courant très importante -démarrage brutal	-couple de démarrage faible -coupure d'alimentation au changement de couplage -moteur 6 bornes	-faible réduction de la pointe de courant au démarrage -nécessite des résistances volumineuses	-nécessite un auto transformateur onéreux -présente des risques de réseau perturbé	-moteur à bague plus onéreux	Convient mal pour les moteur à couple élevé et constant

## I.12. Freinages des moteurs asynchrones

Le fonctionnement d'un système industriel peut nécessiter pour le moteur d'entraînement un ralentissement, un freinage ou un maintien à l'arrêt.

Pour cela, on utilise des systèmes de freinage électromécanique ou électronique.

### I.12.1. Freinage électromécanique :

Il s'agit d'un frein à disque incorporé au moteur, on appelle l'ensemble MOTEUR FREIN.

Une bobine commande le déplacement d'un disque bloqué en rotation. Ce disque vient en contact avec un disque fixé sur le rotor du moteur. Le frottement des deux disques provoque le ralentissement du moteur.

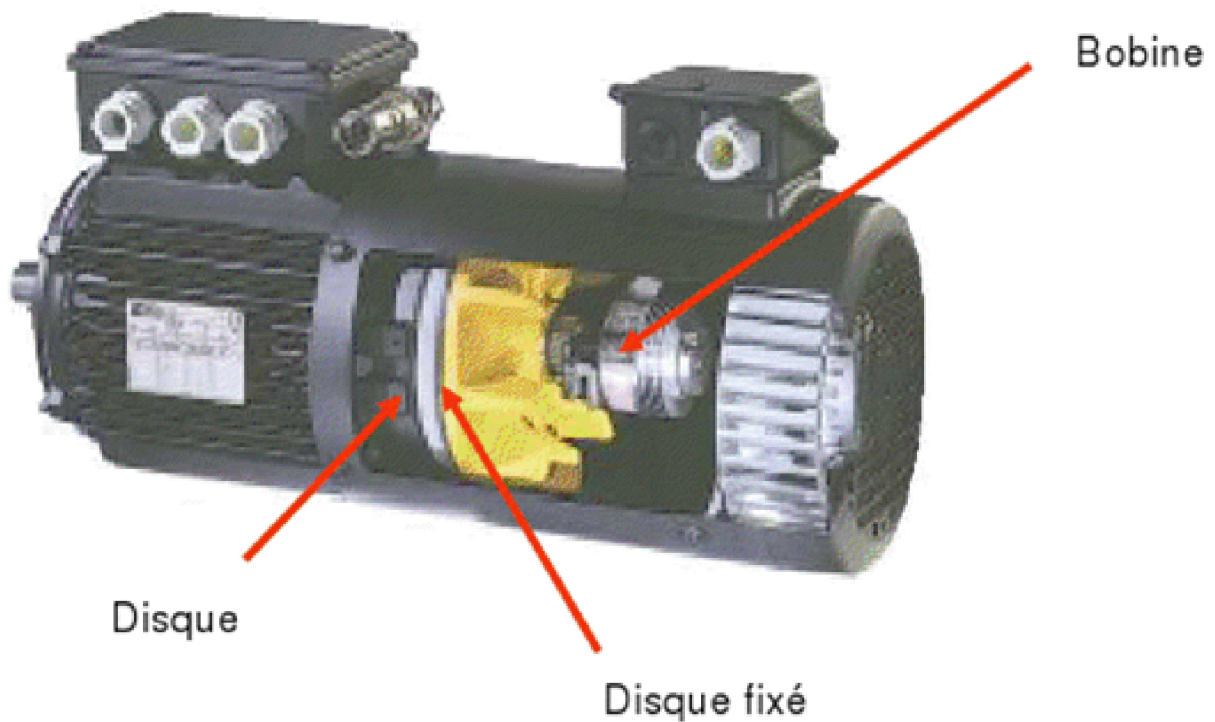


Figure I.18 : Moteur frein

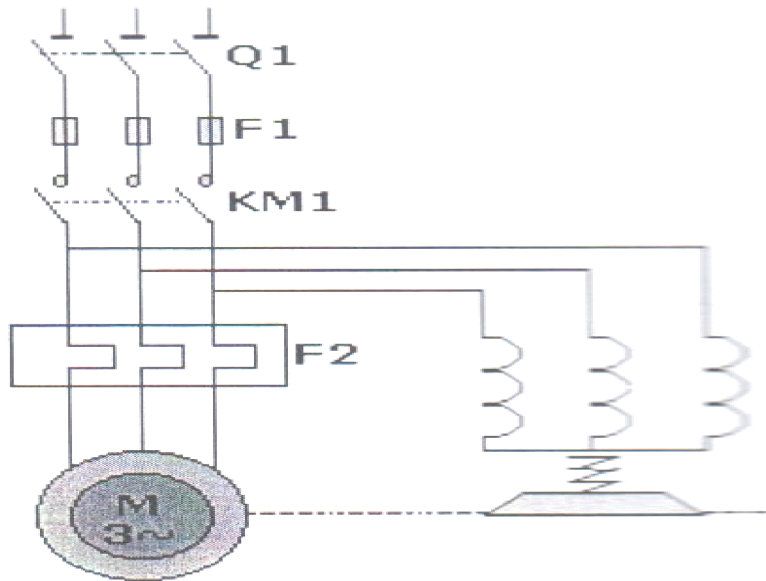


Figure I.19 : Schéma du moteur frein.

A l'absence de courant ou coupure du réseau : ouverture de KM1 un ressort de rappel permet d'assurer le freinage.

### I.12.2. Freinage électronique

#### I.12.2.a) Freinage par contre courant

Cette commande de freinage est obtenue par inversion de deux phases, Le couple de freinage moyen est en général supérieur au couple de démarrage. Ce mode de freinage implique des courants absorbés important environ  $7 I_n$ .

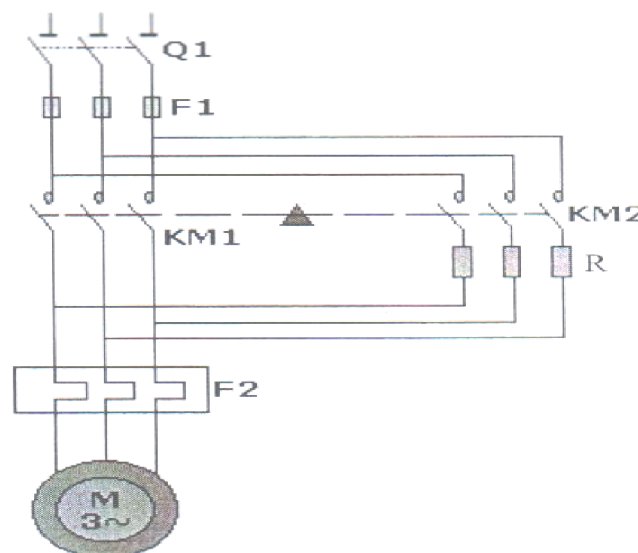


Figure I.20 : schéma de freinage par contre courant

Lors du freinage, il y a ouverture de KM1 puis fermeture de KM2 : le moteur est entraîné par un champ statorique inverse. Les pointes de courant sont très importantes et il est conseillé d'insérer un jeu de résistances pour limiter ce courant. KM2 doit s'ouvrir pour arrêter le moteur. Généralement, un dispositif électrique de coupure déconnecte le moteur de réseau au moment du passage de la vitesse à  $n=0$ .

### I.12.2.b) Freinage par injection de courant continu

Ce freinage consiste, après avoir déconnecté le moteur de l'alimentation, à injecter un courant continu (20 à 24 v) entre deux bornes du stator.

Cela entraîne la production d'un couple résistant qui s'oppose au couple rotor. Plus la valeur du courant est importante, plus le moteur est freiné rapidement.

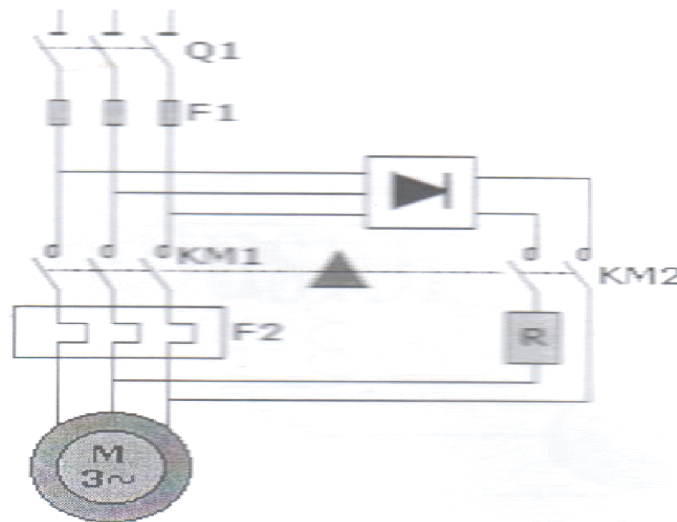
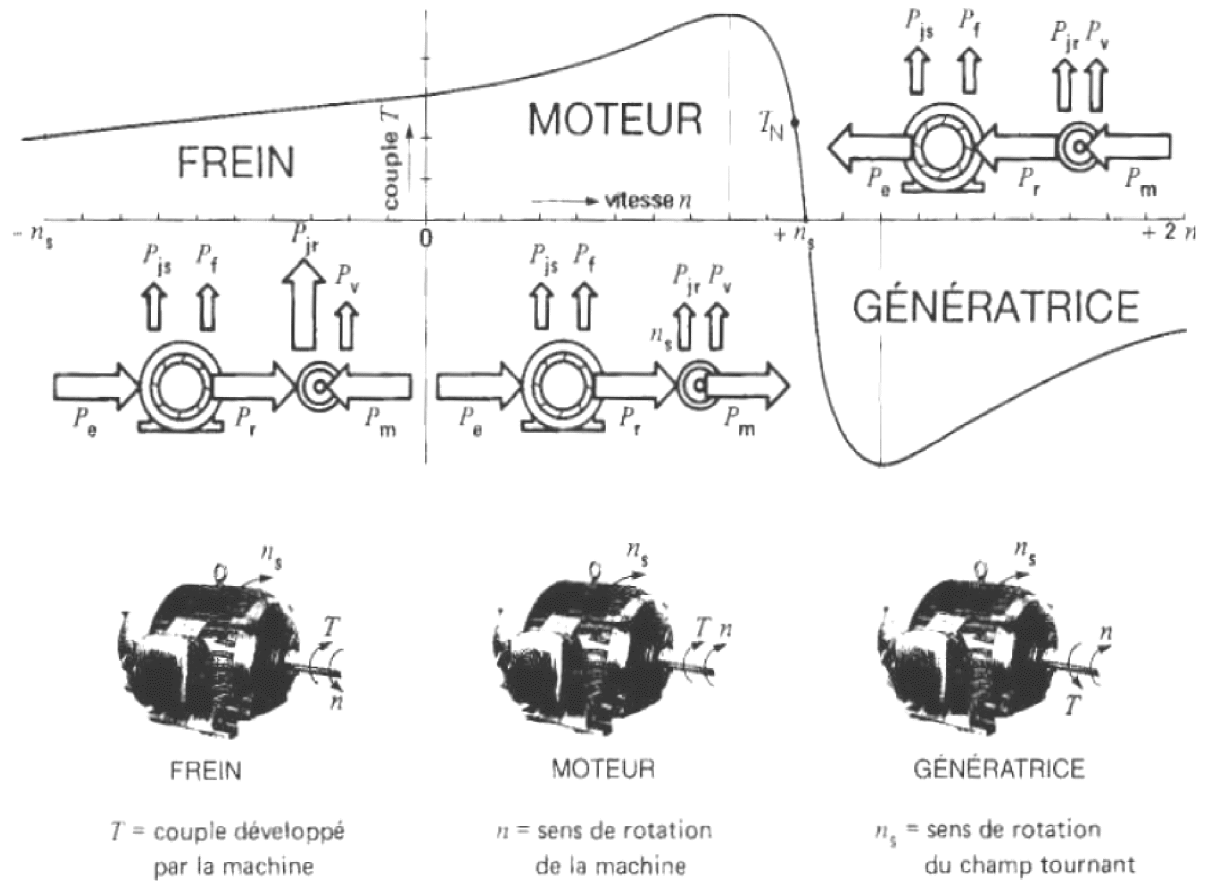


Figure I.21 : schéma du freinage par injection du courant continu.

Au moment du freinage, KM1 s'ouvre puis KM2 se ferme. Un courant continu est injecté dans les enroulements du stator ; celui-ci crée un champ magnétique fixe qui freine le rotor.

➤ Courbe généralisée donnant le couple en fonction de la vitesse d'une machine asynchrone. Noter le sens des puissances dans les trois modes d'opération.



**I.13. Bilan des puissances**

**I.13.1. La puissance électrique absorbée  $P_a$**

La puissance  $P_a$  fournie au stator d'un moteur asynchrone est :

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \tag{I.6}$$

Avec :  $U$  : Tension entre deux phases du moteur [v].

$I$  : courant de ligne [A].

$\cos(\varphi)$  : facteur de puissance.

**I.13.2. Les pertes par effet joule au stator  $P_{js}$**

Ce sont des pertes électriques dissipées par effet joule dans les enroulements statoriques, elles varient en fonction du carré des courants dans ces enroulements.

$$P_{js} = 3 r I^2 \quad (I.7)$$

$r$  : résistance d'une phase statorique [ $\Omega$ ].

$I$  : la valeur efficace du courant traversant l'enroulement statorique [A].

### I.13.3. Les pertes fer au stator $P_{fs}$

Les pertes d'énergie dans le fer du stator dépendent de la tension  $U$  et de la fréquence  $f$  elles sont donc constantes si le moteur est couplé au réseau

$$P_{fs} = P_a - P_{tr} - P_{js} \quad (I.8)$$

### I.13.4. La puissance transmise $P_{tr}$

La puissance transmise au rotor est la puissance du champ magnétique tournant que l'on appelle aussi puissance électromagnétique.

$$P_{tr} = P_a + (P_{tr} + P_{jr}) \quad (I.9)$$

### I.13.5. Les pertes par effet joule au rotor $P_{jr}$

Ce sont des pertes électriques dissipées par effet joule dans les enroulements rotoriques, elles sont données par la formule suivant

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr} \quad (I.10)$$

### I.13.6. Les pertes fer au rotor $P_{fr}$

Les pertes fer rotoriques sont négligeables puisqu'elles dépendent de la fréquence rotorique qui est assez faible.

### I.13.7. Le couple électromagnétique $C_{em}$

Les forces qui s'exercent sur les conducteurs du rotor tournent à la vitesse  $\Omega_s$  et le rotor tourne à la vitesse  $\Omega$ , l'action de l'ensemble des forces électromagnétiques crée ce qu'on appelle un couple électromagnétique résultant d'expression :

$$C_{em} = P_{tr} / \omega \quad (I.11)$$

$C_{em}$  : couple électromagnétique [Nm].

**I.13.8. La puissance mécanique  $P_{mec}$** 

Le couple électromagnétique de moment  $C_{em}$  entraîne le moteur à la vitesse  $\omega$ , il lui communique de la puissance électromécanique  $P_e$  qui sera égale à :

$$P_u = P_e - P_{mec} \quad (I.12)$$

**I.13.9. les pertes mécaniques  $P_{mec}$** 

Elles regroupent les pertes par frottements et par ventilation

$$P_{mec} = P_e - P_u \quad (I.13)$$

**I.13.10. La puissance utile  $P_u$** 

La puissance utile  $P_u$  fournie par le moteur est inférieure à la puissance mécanique.

$$P_u = P_e - P_{mec} \quad (I.14)$$

Cette partie de puissance est disponible sur l'arbre du moteur, elle est celle chargée de l'entraînement.

**I.14. Conclusion**

Dans notre premier chapitre, nous avons essayé de donner un aperçu général sur le moteur asynchrone, en décrivant ses différentes parties électrique, mécanique et magnétique.



**Chapitre II**

**Fonctionnement et démarrage des  
PCI**

## II.1. Introduction

Il existe un grand nombre de pompes. Ces différents types peuvent tous se rattacher, à quelques exceptions près, à deux grandes catégories suivant la technique utilisée et correspondant à la classification suivie par la norme AFNOR 6E644001, ces deux catégories sont :

- . Les pompes volumétriques.
- . Les pompes roto-dynamiques appelés encore les turbopompes.

Au par avant on a dit que notre travail sera basée sur le comportement du moteur asynchrone qui entraîne une pompe centrifuge immergée, cette pompe est classée parmi les pompes roto-dynamiques (turbo-pompes), donc on s'intéressera plus sur ce type de pompes.

## II.2. Les pompes roto-dynamiques

Elles sont toutes rotatives, Une turbopompe est un appareil dans lequel l'énergie transmise au liquide est une énergie principalement cinétique, qui lui est communiquée par l'intermédiaire d'un rotor, mais n'est pas en relation invariable avec le déplacement du rotor ; d'autre part, elle n'est pas distribuée uniformément dans tout le liquide. Ce sont les pompes centrifuges, à hélice, hélico-centrifuge. [7]

### II.2.1 Principe de fonctionnement des pompes centrifuges

Une pompe centrifuge est constituée par:

- une roue à aubes tournant autour de son axe
- un distributeur dans l'axe de la roue
- un collecteur de section croissante, en forme de spirale appelée volute.

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur et la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine. Il acquiert une grande énergie cinétique qui se transforme en énergie de pression dans le collecteur où la section est croissante.

L'utilisation d'un diffuseur (roue à aubes fixe) à la périphérie de la roue mobile permet une diminution de la perte d'énergie.

### II.2.2. Utilisation

Ce sont les pompes les plus utilisées dans le domaine industriel **grâce à** la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût.

Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas:

- utilisation **des** liquides visqueux: la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
- utilisation **des** liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tels que le vin, le lait et la bière).
- utilisation comme pompe doseuse: la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.

Par contre contrairement à la plupart des pompes volumétriques, les pompes centrifuges admettent les suspensions chargées de solides.

### II.2.3. Amorçage

Les pompes centrifuges ne peuvent **pas** s'amorcer seules. L'air contenu nécessite d'être préalablement chassé. On peut utiliser un réservoir annexe placé en charge sur la pompe pour réaliser cet amorçage par gravité.

Pour éviter de désamorcer la pompe à chaque redémarrage il peut être intéressant d'utiliser un clapet anti-retour au pied de la canalisation d'aspiration.

### II.2.4. Réglage du débit

Trois moyens sont possibles:

- variation de la vitesse de rotation de la pompe par un dispositif électronique
- vanne de réglage située sur la canalisation de refoulement de la pompe pour éviter le risque de cavitation: suivant son degré d'ouverture, la perte de charge du réseau va augmenter ou diminuer ce qui va entraîner la variation du point de fonctionnement
- réglage en "canard" avec renvoi à l'aspiration d'une partie du débit

Le réglage du débit est important pour des besoins dus au procédé mais aussi pour se placer dans des plages de fonctionnement où le rendement est meilleur.

### **II.2.5. types de pompes centrifuges**

- pompes centrifuges à axe horizontal :
  - pompes centrifuges à corps volute.
  - pompes centrifuges à turbines et diffuseurs.
  - pompes centrifuges à flux mixte.
  - pompes centrifuges auto- amorçantes.
  
- pompes centrifuges à axe vertical :
  - pompes centrifuges axe vertical, moteur en surface.
  - pompes centrifuges immergées ou groupe électropompe.

### **II.3. Les pompes centrifuges immergées (PCI) [13]**

Dans notre cas, on traite le moteur asynchrone utilisé pour l'entraînement d'une électropompe ou une pompe centrifuge immergée (PCI).

#### **II.3.1. définition d'une (PCI) :**

Une Pompe Centrifuge Immergée (PCI) est constituée d'un empilage d'étages insérés dans un corps de pompe. Chaque étage est constitué d'une Roue et d'un Diffuseur. Le Diffuseur est fixe dans le corps de pompe alors que les roues sont clavetées sur l'arbre de pompe qui est entraîné par le moteur électrique.

Chaque étage a un débit nominal ainsi qu'une hauteur manométrique spécifique qui est liés à son diamètre et à sa géométrie. La hauteur manométrique totale développée par une pompe est égale à la somme des hauteurs manométriques de chacun des étages. [7]

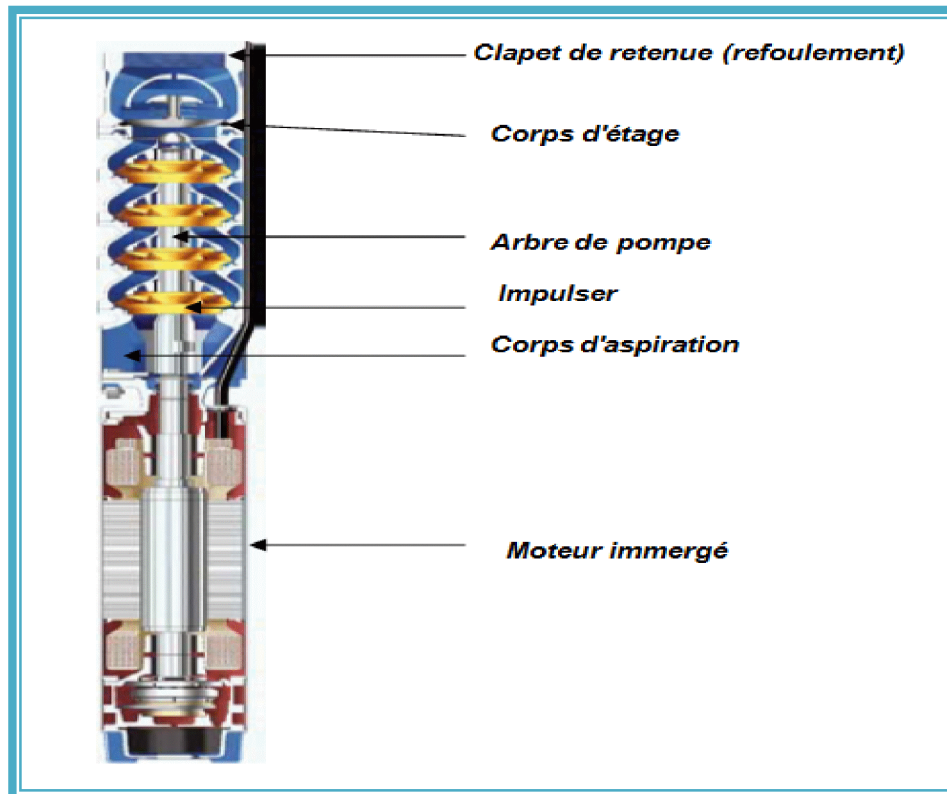


Figure II.1 : composition d'une électropompe (PCI).

### II.3.2. Vue Éclatée d'un Étage :

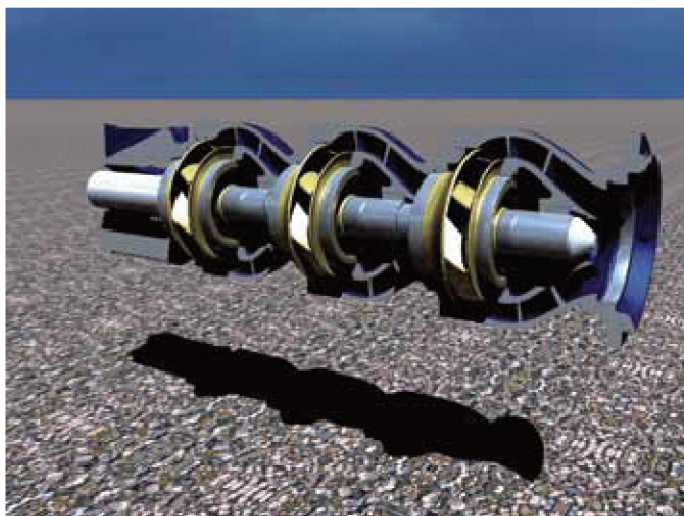


Figure II.2 : Pompe en coupe.

### II.3.3. Principe de Fonctionnement

Malgré l'appellation Roue flottante (floating Impeller), une Roue n'est jamais flottante, mais elle est libre de tout mouvement axial sur son arbre. Ainsi, lorsqu'une pompe fonctionne sur sa plage de fonctionnement les roues se trouvent toujours en position basse, soit en légère position (Downthrust).

La position Downthrust augmente à mesure que le débit produit diminue, soit en fonctionnement à gauche de la courbe.

La position Upthrust augmente à mesure que le débit augmente, soit en fonctionnement sur la droite de la courbe.

Un fonctionnement à gauche de la courbe augmente l'usure des étages et notamment l'usure du joint plat situé au-dessous de la roue.

Un fonctionnement à droite de la courbe augmente l'usure des étages et notamment l'usure du joint plat situé au-dessus de la roue.

Pour assurer une plus longue durée de vie de la pompe, il est donc impératif de faire fonctionner la pompe dans sa courbe de fonctionnement.

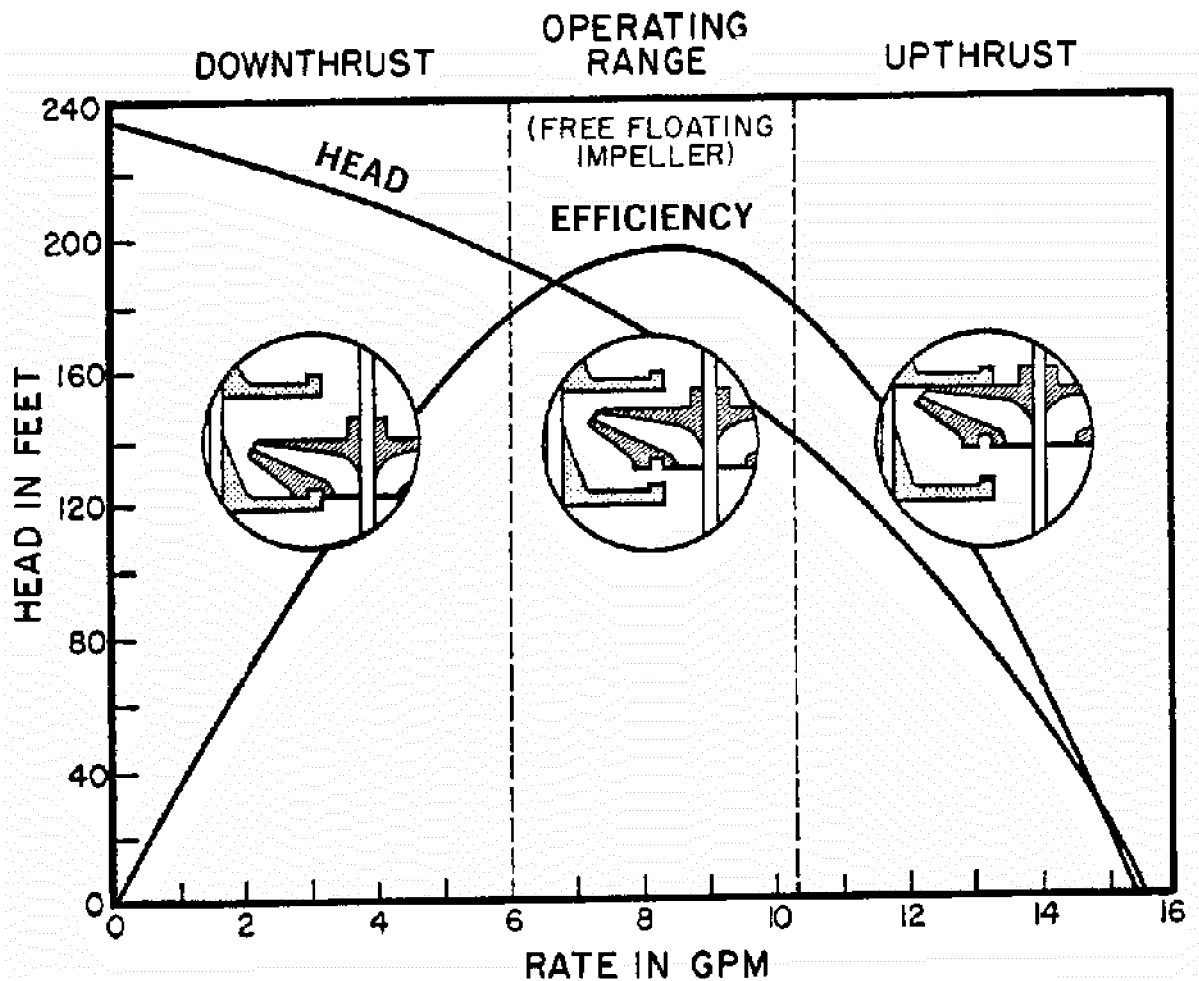


Figure II.3 : courbe caractéristique de la (PCI).

Chaque pompe a donc une courbe caractéristique qui lui est propre. Cette courbe est généralement donnée à vitesse fixe et à vitesse variable, voir courbes en annexes.

### II.3.3. Caractéristiques débit-vitesse:

Le débit de cette pompe est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. Toutefois il faut une vitesse minimale à une  $H_m$  donnée pour obtenir un débit.



Figure II.3 : Caractéristiques débit-vitesse d'une pompe centrifuge.

### II.3.4. Caractéristiques couple-vitesse

Le couple du moteur augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une Hm donnée pour obtenir un débit de départ non nul.

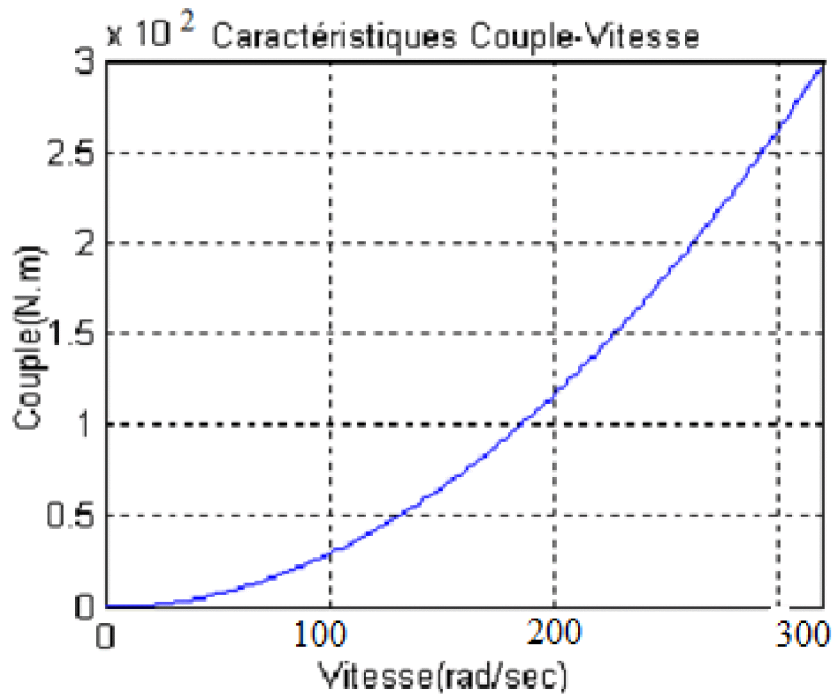
Donc la pompe centrifuge oppose un couple résistant  $C_r$  :

$$C_r = k_r \omega^2 + C_s \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$k_r$  : coefficients de proportionnalité  $[(\text{Nm}/\text{rad.s}^{-1})^2]$

$C_s$  : le couple statique, très petite.



**Figure II.4 :** Caractéristiques couple - vitesse d'une pompe centrifuge.

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

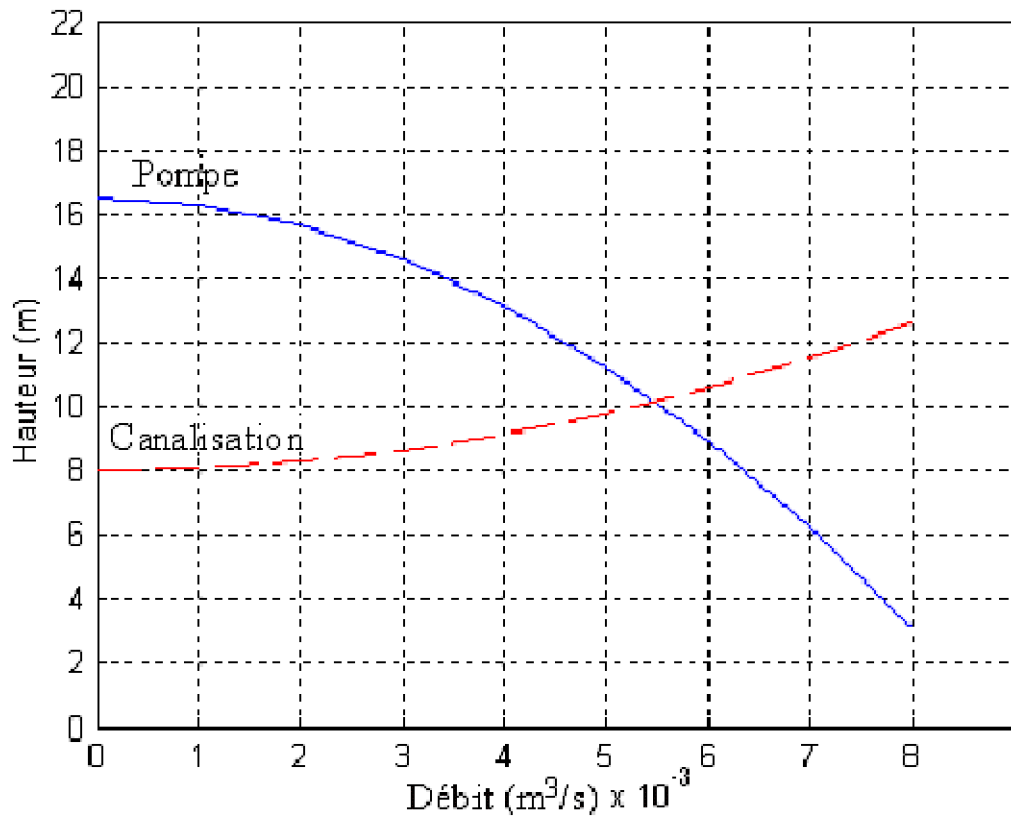
$$P_{\text{méc}} = k_r \cdot \omega^3 \quad (\text{II.2})$$

### II.3.5. Caractéristiques débit-hauteur :

La courbe débit-hauteur, exprime les variations des différentes hauteurs de relèvement en fonction de débit.

Les constructeurs sont en mesure de fournir au client les courbes  $Q(HMT)$  maximale et minimale correspondant aux diamètres maximaux et minimaux possibles de la roue.

Si la charge de moteur est une pompe émergée monocellulaire à roue radiale. Elle est caractérisée par un modèle qui sert à déterminer la dépendance de la hauteur manométrique totale HMT en fonction du débit  $Q$ .



**Figure II.5** : Caractéristiques de la pompe HMT(Q) et de la canalisation.

En prenant comme paramètre la vitesse de rotation du moteur, le modèle utilisé est identifié par l'expression de "PELEIDER-PETERMAN"

$$\text{HMT} = k_0 \cdot \omega^2 - k_1 \cdot \omega Q - k_2 \cdot Q^2 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$k_0, k_1, k_2$  : des constants propres de la pompe donnée par le constructeur.

$\omega$  : La vitesse (rad/sec)

HMT: la hauteur (mètre)

Q : débit (l/min)

La courbe HMT(Q) comme indiquée sur la Figure (II.5) est une parabole. Le point de rencontre de la courbe HMT(Q) avec l'axe des ordonnées est le point à débit nul. C'est le point à vanne fermée ou encore point de barbotage.

Pour les groupes électropompes (pompe moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement, comme on peut tracer la courbe de rendement hydraulique en utilisant la formule :

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_{ab}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :  $P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{MT}$

$\rho$  : La masse volumique de l'liquide  $\text{kg/m}^3$ .

$g$  : Accélération de la pesanteur ( $9,81 \text{m}^2/\text{s}$ ).

$Q$  : Débit de liquide.

$H_m$  : Hauteur manométrique totale.

$P_{ab}$  : Puissance fournie par le moteur.

Généralement le rendement maximal du groupe motopompe ne dépasse pas 72%.

Le schéma de Figure (II.6) présente les valeurs de rendement d'une pompe :

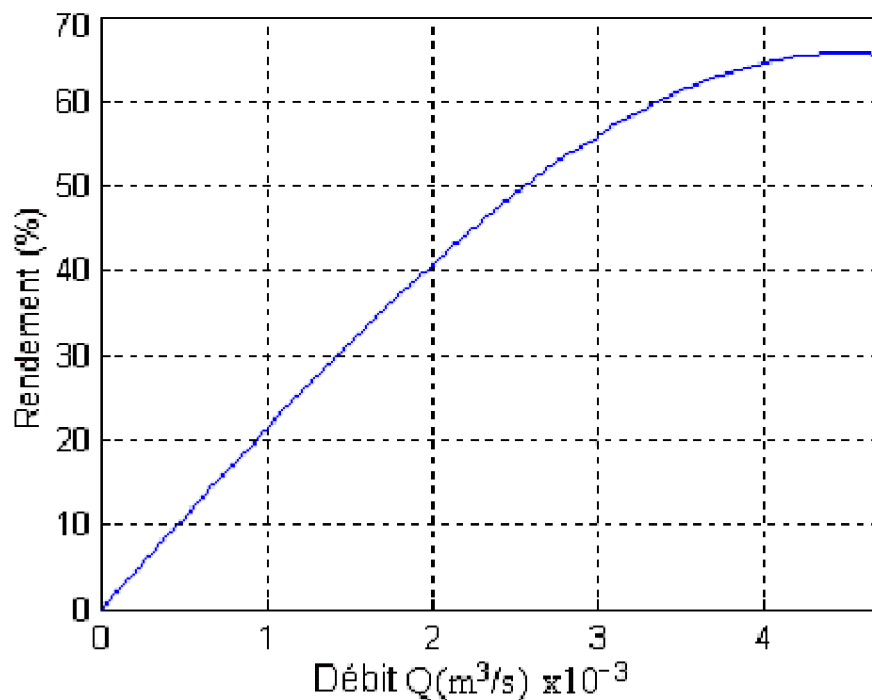
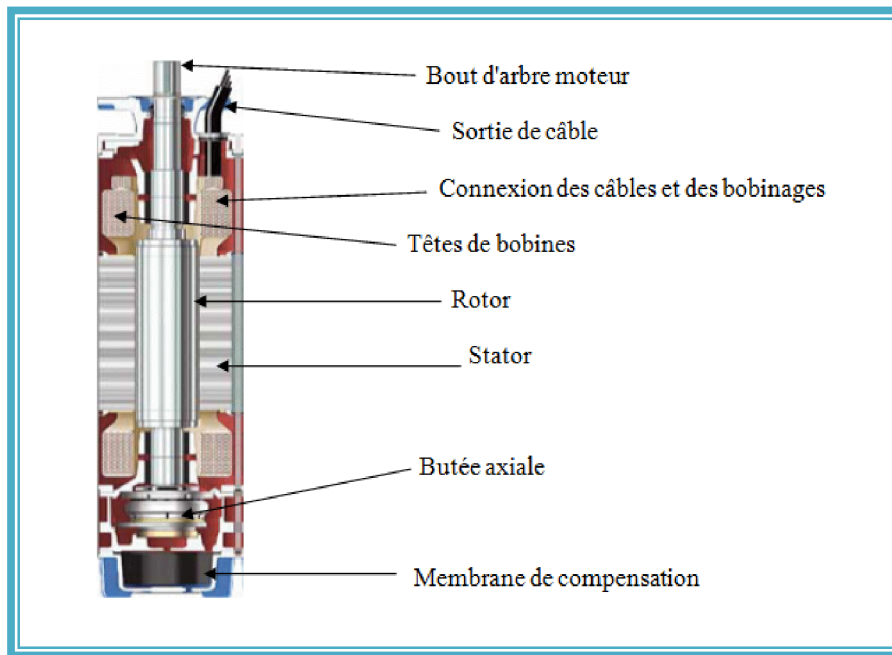


Figure II.6 : Caractéristiques de rendement de la pompe centrifuge.

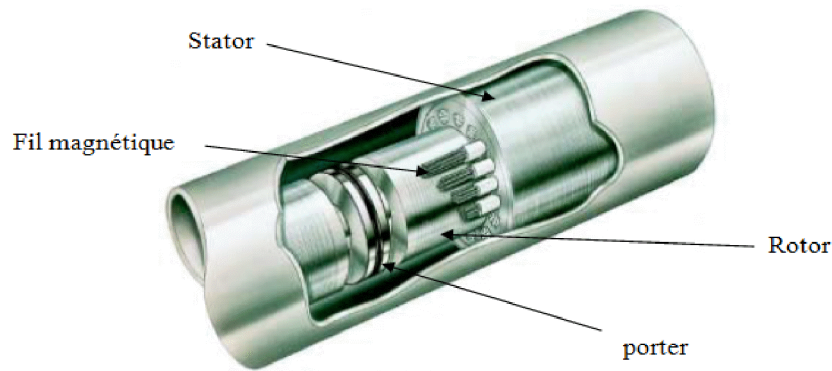
#### II.4. moteur d'entraînement [7]

Le moteur électrique constituant un système de Pompe Centrifuge Immergée est un moteur asynchrone, deux pôles, triphasé à cage d'écureuil. Il tourne à la vitesse nominale de 3500 tr/mn à 60 HZ et 2900 tr/mn à 50 HZ et de puissance 3.5 KW.



**Figure II.7 :** construction de moteur d'entraînement d'une PCI.

Le circuit magnétique du ROTOR est généralement réalisé par un empilage de tôles magnétiques percées d'encoches semi fermées ou fermées qui reçoivent des barres à raison d'une par encoche; toutes ces barres étant réunies entre elles à chacune de leurs extrémités par des joues de court-circuit. Ce type de ROTOR est dit 'Cage d'écureuil'. [7]

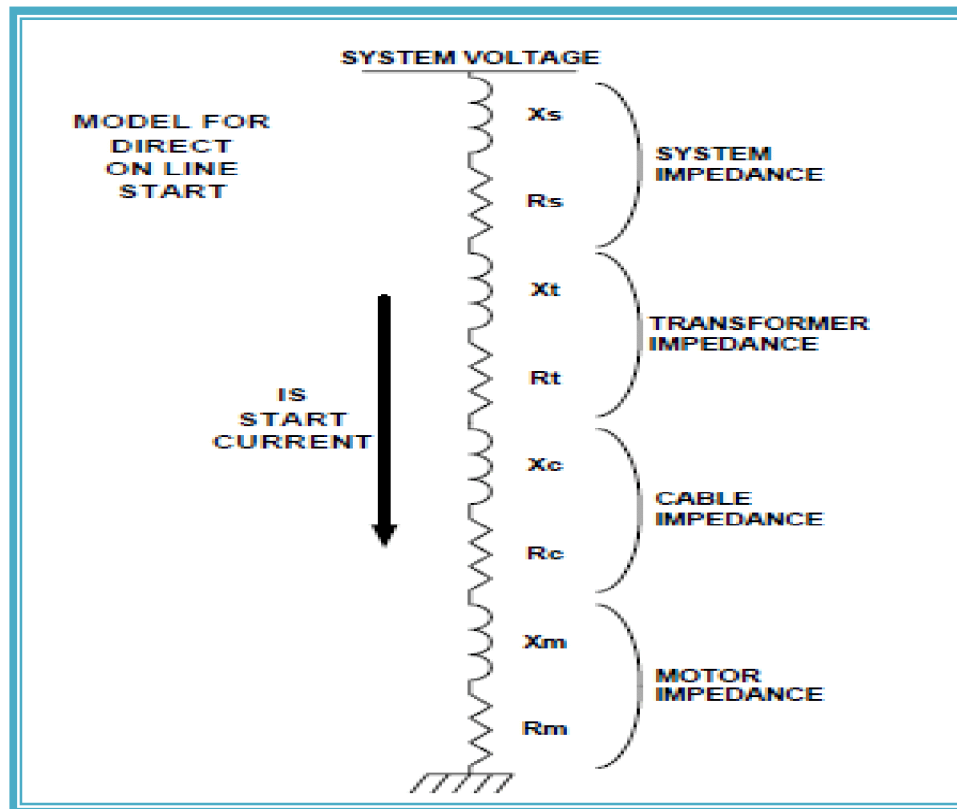


## II.5. Démarrage du Moteur d'entraînement [13]

### II.5.1. Démarrage direct (DOL)

Les Moteurs, pour la plupart, démarrent par amenée de toute la tension disponible à la surface aux bornes de celui-ci. Le démarreur utilisé est appelé un démarreur à “pleine tension” et la méthode de démarrage est dite “directement en ligne” ou “démarrage en directe” (DOL). Le terme “pleine tension” prête un peu à confusion pour les PCI, car la plupart des systèmes PCI présentent une importante chute de tension sur le câble d'alimentation et, en fait, donnent un démarrage à tension réduite. Le démarrage DOL est de loin la méthode la plus communément adoptée pour les moteurs asynchrones, notamment le moteur submersible. C'est la moins coûteuse et la plus fiable, et elle doit donc être envisagée en premier et il doit y avoir de bonnes raisons pour envisager d'autres méthodes.

Afin de comprendre si le démarrage DOL est viable pour une application particulière, un modèle électrique par phase est adopté. Un modèle typique de ce type est représenté par la figure (II.8). Le système d'alimentation est modélisé en tant que source idéale de tension avec impédance en série. Le transformateur abaisseur, le câble d'alimentation et le moteur situé en fond de puits sont modélisés chacun avec une inductance et une résistance en série. Les buts consistent à assurer que le couple de démarrage développé par le moteur est suffisant pour d'un côté démarrer de façon adéquate la PCI pendant toute sa durée de vie et de garantir que le couple de démarrage développé ne détériorera pas la PCI d'un autre côté. Le courant de démarrage du moteur peut servir d'indicateur de son couple de démarrage. La relation entre courant et couple est établie par test, et chaque type de machine aura ses propres caractéristiques uniques, ce qui rend la généralisation dangereuse. [7]



**Figure II.8 :** Modèle d'Impédance du Système pour un Démarrage en Direct

Le courant de démarrage du moteur peut être calculé au moyen du modèle par phase représenté par la figure (II.8). La réactance du rotor à l'arrêt du moteur ( $X_m$ ) est fonction de la tension disponible à ses bornes dans les conditions de blocage du rotor. Malheureusement,  $X_m$  est nécessaire pour calculer la tension aux bornes du moteur à partir du modèle. Une méthode peut être appliquée pour déterminer la tension aux bornes du moteur. Pour y parvenir, on établit l'hypothèse d'une tension aux bornes du moteur. Une valeur pour  $X_m$  peut alors être déterminée à partir des données du test de blocage du rotor pour ce moteur particulier. Le courant de démarrage et la tension obtenue aux bornes du moteur peuvent alors être calculés. Si la tension calculée aux bornes du moteur ne concorde pas avec cette valeur hypothétique, il faut augmenter ou diminuer cette valeur et répéter l'opération jusqu'à ce que les valeurs hypothétiques et calculées concordent. Cette méthode peut prendre beaucoup de temps si elle est réalisée manuellement, mais elle peut être facilement adaptée à des logiciels du commerce à l'aide d'un calculateur programmable.

### II.5.2. Démarrage à Tension Réduite

Le démarrage à tension réduite, souvent appelé démarrage en douceur, concerne plusieurs méthodes employées pour réduire la tension amenée aux bornes du moteur durant la phase de démarrage. Il y a plusieurs années, le démarrage à tension réduite était très intéressant en tant que moyen pour prolonger la durée de vie d'une PCI. L'idée de limiter le nombre de démarrage pour augmenter la durée de vie des équipements est pratiquement acceptée universellement. Le démarrage à tension réduite était considéré comme un moyen de réduire l'impact du démarrage, en prolongeant la durée de vie des PCI. Parmi les divers problèmes qui peuvent être associés au démarrage, seule la défaillance de l'arbre due à un couple de démarrage excessif est concernée par le démarrage à tension réduite. Il s'agit de l'application la plus commune du démarrage à tension réduite des PCI, typiquement sur les installations à câbles courts dans lesquelles la pompe et/ou le Seal fonctionnent près de leur puissance maximum.

Une deuxième raison d'envisager le démarrage à tension réduite est de réduire l'impact du démarrage du moteur sur le système d'alimentation. Il n'est pas rare que les compagnies d'électricité demandent d'adopter le démarrage à tension réduite pour éviter qu'un client en gêne d'autres. Les compagnies d'électricité préfèrent généralement les moteurs en surface, qui peuvent nécessiter plusieurs secondes pour atteindre leur plein régime selon la charge. Les PCI, d'autre part, démarrent beaucoup plus vite, en 0,1 à 0,2 secondes. Les effets du démarrage d'une PCI sont donc bien inférieurs et les directives traditionnelles des compagnies d'électricité, qui exigent le démarrage à tension réduite, ne sont pas totalement applicables. Dans de nombreux cas, la compagnie d'électricité peut renoncer à cette exigence après avoir compris la PCI et ses caractéristiques de démarrage. [7]

Si un démarreur à tension réduite est utilisé, il est important de le comprendre et de savoir pourquoi il est utilisé, afin de s'assurer qu'il est correctement configuré. La réduction de la tension de démarrage peut avoir des effets similaires à ceux qui sont discutés en relation avec la Figure (10). La réduction de la tension en surface a le même effet que l'accroissement de la chute de tension aux bornes du moteur. Si le démarrage à tension réduite n'est pas correctement appliqué et configuré, il peut gravement détériorer la PCI. L'idée que si un peu est bien, beaucoup doit être mieux, n'est pas valable pour le démarrage à tension réduite.

La relation entre couple et vitesse de l'arbre pour les moteurs asynchrones est traditionnellement représentée sous forme de courbe du couple (axe-y) en fonction de la vitesse du moteur (axe x) et est appelée la courbe couple vitesse. La courbe sur la figure (II.9) est une relation typique couple vitesse d'un moteur. Les valeurs du couple, à toutes les vitesses, sont à 100 % de la tension indiquée sur la plaque signalétique du moteur. Ceci pourrait être utile pour un moteur en surface dont la tension aux bornes restera relativement constante durant le démarrage ; cependant, avec un moteur de fond et la longueur de câble associée, la tension aux bornes du moteur durant le démarrage chutera de façon importante.

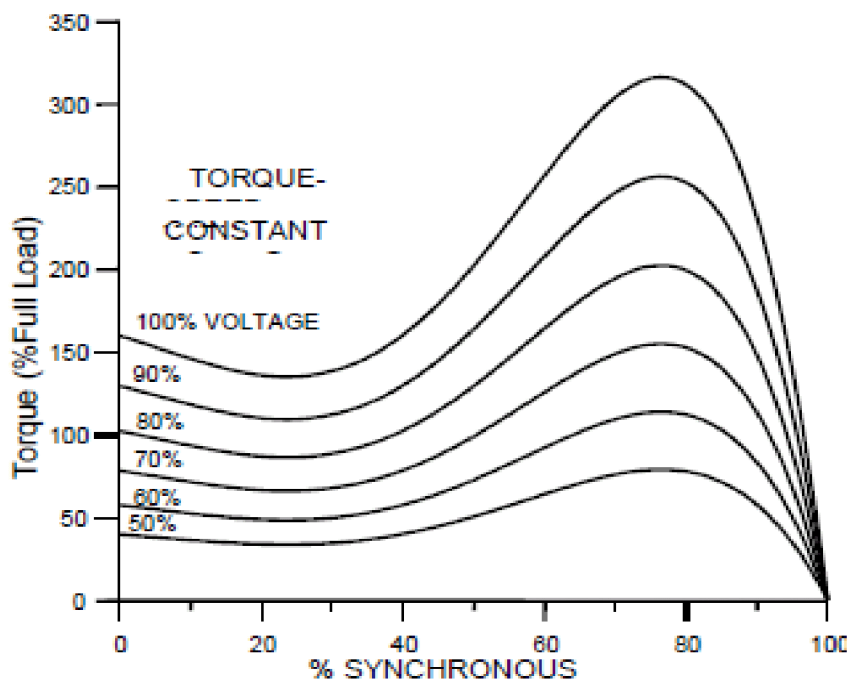
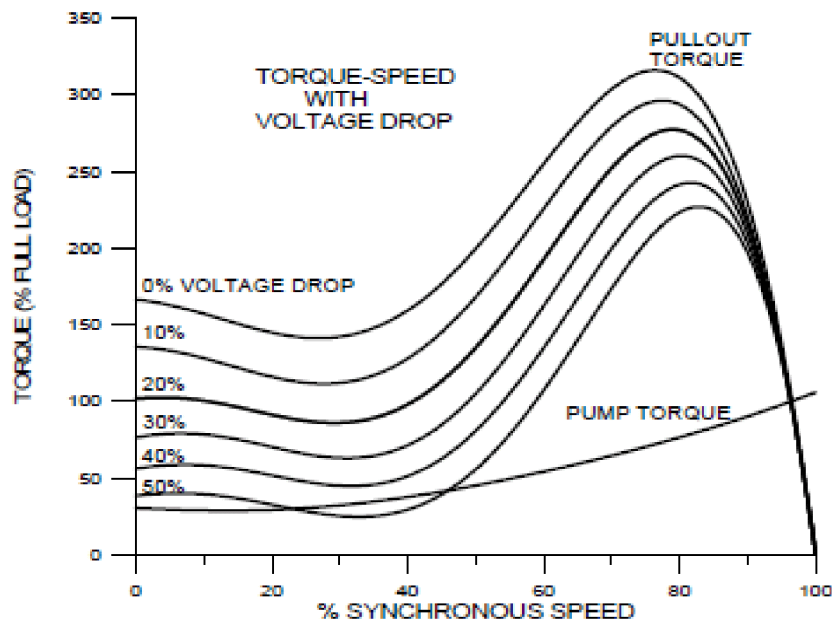


Figure II.9 : courbe couple-vitesse.

La relation couple vitesse du moteur varie continuellement en fonction de la tension, et une plus faible tension aux bornes du moteur donnera un couple plus bas. La figure (II.9) représente l'effet de la tension réduite sur la relation couple vitesse. Toutefois, cette figure (II.9) ne décrit pas de façon adéquate la relation totale entre couple et vitesse pour le moteur de fond et le câble.

Lorsque la tension est amenée en premier, l'impédance du moteur est à sa valeur la plus basse, le courant de démarrage et la chute de tension dans le câble qui en résulte sont à leur maximum. Lorsque le moteur commence à tourner, son impédance s'accroît, en réduisant le courant et la chute de tension dans le câble, en augmentant la tension aux bornes du moteur.

Lorsqu'il tourne à plein régime, le moteur est à son impédance maximum et à son courant le plus bas. En admettant que nous avons compensé correctement la chute dans le câble fonctionnant à pleine charge, le moteur devrait fonctionner à la tension indiquée sur sa plaque signalétique. La figure (II.10) représente de plus près la relation couple vitesse avec le câble. [7]



**Figure II.10:** courbe couple-vitesse à pleine tension.

La courbe du haut sur la figure (II.10) est la courbe couple vitesse à pleine tension. Lorsque la chute de tension due à l'impédance du système et du câble augmente, le couple aux basses vitesses chute énormément, mais récupère en raison de l'élévation de l'impédance du moteur et de la chute associée de courant au fur et à mesure que le moteur accélère.

La charge du moteur dans le cas d'une utilisation avec une pompe centrifuge, exige un couple qui varie approximativement avec le carré de la vitesse. Une partie de la charge de la pompe est le frottement qui sera à son maximum lorsque la pompe s'arrête. Dès que le moteur entraîne la pompe, cette partie de la charge chute. La figure (II.10) montre une courbe représentant le couple exigé par la pompe. Le couple de démarrage est proportionnel au carré de la tension aux bornes du moteur. Une faible réduction de la tension peut avoir un effet beaucoup plus important sur le couple de démarrage. Si la tension est trop réduite, le moteur ne démarre pas. Pour mieux comprendre les

effets des démarreurs à tension réduite, certains des différents types utilisés avec les PCI sont discutés ci-après.

### **II.5.1.a).Inducteur Série**

Un inducteur série est placé dans chacune des trois phases pour abaisser la tension. La chute de tension est proportionnelle au débit de courant dans l'inducteur. Durant le démarrage, le courant passant dans l'inducteur est élevé et provoque une chute de tension proportionnellement élevée. Une fois le moteur démarré, le courant s'abaisse au courant de fonctionnement normal, en réduisant la chute de tension dans l'inducteur. L'inducteur peut être laissé dans le circuit ou il peut être by-passé par un contacteur. S'il est laissé dans le circuit, la tension du système doit compenser la chute de tension durant le fonctionnement et l'inducteur doit être capable de fonctionner en continu au courant de fonctionnement. S'il est by-passé, l'inducteur doit supporter le courant pour le cycle cour de démarrage et il peut donc être physiquement beaucoup plus petit et moins coûteux. Les inducteurs peuvent être munis de prises pour choisir l'inductance appropriée pour l'application. Le principal inconvénient du démarreur avec inducteur est que le courant de démarrage doit être connu pour déterminer la chute de tension à travers l'inducteur.

Une variante du démarreur à inducteur consiste à employer un inducteur principal saturable qui régule automatiquement la chute de la tension. Une fois le moteur démarré, l'inducteur est by-passé par un contacteur. Le premier avantage de ce dispositif est que la chute de tension reste la même quel que soit le courant. Il n'est donc pas nécessaire de connaître le courant de démarrage pour déterminer la chute de tension. [7]

### **II.5.1.b).Transformateur d'Impédance Elevée**

Un transformateur spécial d'impédance élevée remplace le transformateur abaisseur.

L'impédance plus élevée agit de façon très similaire au démarreur à inducteur discuté plus haut et provoque une importante chute de tension au démarrage. La prise de tension appropriée doit être choisie pour compenser la chute de tension du transformateur durant son fonctionnement. Comme avec l'inducteur, le courant de démarrage doit être connu pour déterminer la chute de tension. Un maximum d'environ 10 à 12% d'impédance est possible. Transformateur durant son fonctionnement. Comme avec l'inducteur, le courant de démarrage doit être connu pour déterminer la chute de tension. Un maximum d'environ 10 à 12% d'impédance est possible.

**II.5.1.c). Autotransformateur**

Un autotransformateur abaisseur est employé pour fournir une tension plus basse pour le démarrage. Il fournit deux sources ou plus, de tensions séparées pour le moteur. Les contacteurs peuvent commuter la tension plus basse pour le démarrage, puis commuter sur la pleine tension après l'achèvement du démarrage. L'autotransformateur peut être muni de prises pour choisir la tension de démarrage appropriée et peut être assez petit en raison du cycle court de fonctionnement. La tension de démarrage sera raisonnablement constante durant le démarrage, grâce à la faible impédance de l'autotransformateur, il n'est donc pas nécessaire de connaître le courant de démarrage pour obtenir une estimation raisonnable de la chute de tension.

**II.5.1.d). Semi -conducteurs**

Le démarreur à tension réduite à semi-conducteurs comporte des redresseurs thyristorisés pour réguler la tension de sortie. La régulation est réalisée en permettant à ces redresseurs de conduire pendant seulement une partie du cycle de tension ; plus le temps de conduction est réduit, plus la tension est basse. Ce type de démarreurs est le plus élégant des démarreurs à tension réduite et il assure une régulation continue de pratiquement zéro à pleine tension. La régulation continue de la tension permet une flexibilité considérable et a abouti à plusieurs techniques de démarrage différentes adoptées sur les PCI. Certaines de ces techniques sont :

➤ Rampe de tension

La tension est une rampe linéaire en fonction du temps de la tension zéro à pleine tension. Le temps de rampe est réglable. A un certain point durant le cycle de démarrage, la tension aux bornes du moteur sera assez élevée pour que le moteur démarre. Cette méthode ne fournit pas beaucoup de régulation et le cycle de démarrage doit être long.

➤ Courant constant

Le démarreur régule le courant de sortie à une valeur pré-réglée qui est connue pour être suffisante pour faire démarrer le moteur. Ce système fonctionne bien, du fait que le démarreur monte rapidement à la tension qui peut fournir le courant réglé. Il en résulte une réduction au minimum du temps de tensions trop basses pour le démarrage ; cependant, si le courant réglé est trop faible ou si les conditions changent, il se peut que le moteur ne puisse pas démarrer.

➤ Rampe de courant

La rampe de courant fonctionne de façon très similaire au courant constant, du fait que le courant de démarrage est régulé à une valeur préréglée. La différence est que la rampe de courant a deux points de consigne du courant. Durant le cycle de démarrage, le démarreur monte rapidement à la tension qui supportera le premier courant préréglé, puis monte à une vitesse réglable jusqu'au second courant préréglé. Cette approche réduit aussi au minimum le temps avec des tensions qui sont trop faibles pour le démarrage et fournit une protection supplémentaire contre les variations possibles dans les conditions de démarrage. La configuration appropriée consisterait à régler le premier point de consigne du courant à une valeur qui devrait démarrer le moteur et le second à une valeur beaucoup plus élevée, mais pas assez élevée pour rompre un arbre. Le temps de rampe devrait être très court, pas plus de 1,5 secondes.

### II.5.2. Démarrage à Fréquence Variable

L'utilisation de Variateurs à fréquence variable pour faire fonctionner les PCI a donné une autre dimension au démarrage. Nous pouvons non seulement faire varier la tension de démarrage, mais également la fréquence de démarrage. Le courant minimum de démarrage est communément utilisé comme critère de démarrage d'une PCI, et la relation suivante peut être appliquée pour déterminer le courant requis pour un couple équivalent à d'autres fréquences de démarrage.

Couple  $\propto I^2/f$

Avec le réglage du couple de démarrage à 50 Hz, égal au couple de démarrage à la fréquence " f ", on obtient :

$$I_{50}^2 / 50 \text{ Hz.} = I_f^2 / f \quad (\text{II.5})$$

$$I_f = I_{50} \sqrt{f / 50}$$

Par exemple :

Déterminer le courant de démarrage requis pour démarrer un moteur à 10 Hz, ce qui exige 300 % du courant indiqué par la plaque signalétique à 50 Hz.

$$I_{10} = (300\%) \left( \sqrt{10/50} \right) = 134\% \quad (\text{II.6})$$

Un courant de démarrage en fond de puits égal à 134 % de celui qui est indiqué par la plaque signalétique du moteur à 10 Hz donnerait approximativement le même couple de démarrage que 300 % de la valeur indiquée par la plaque signalétique du moteur à 50 Hz.

Les Variateurs typiquement utilisés avec les PCI sont à basse tension (380 V, 400 V, 415 V, et 480 V), et un transformateur élévateur est utilisé pour adapter la tension au secondaire à la tension requise au fond. Pour fonctionner à des fréquences autres que 60 Hz la tension aux bornes du moteur doit être réglée proportionnellement.

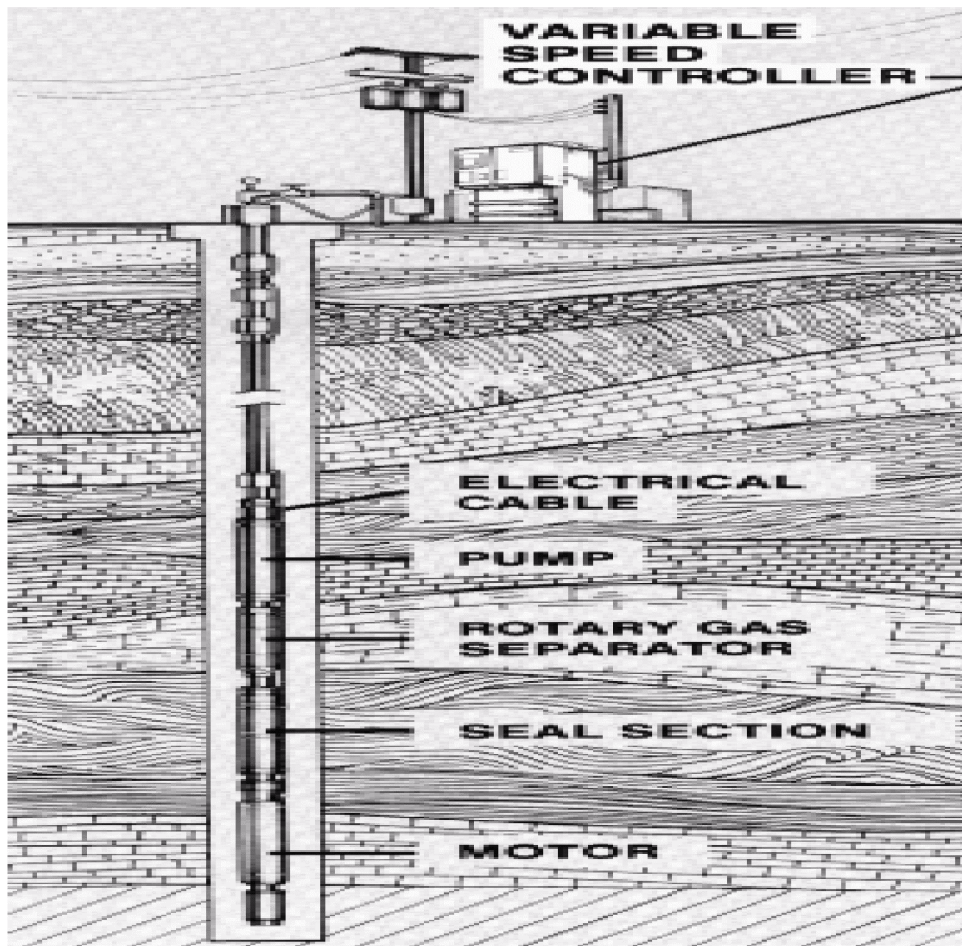


Figure II.11: système de pompage a débit variable.

Cela est vrai également pour le démarrage. Un démarrage à 10 Hz nécessiterait 1/5ème de la tension à 50 Hz. Cependant, aux basses fréquences, la résistance du câble est beaucoup plus importante, comparée à la réactance du moteur, et il peut être nécessaire d'augmenter ou de "pousser" la tension de sortie pour obtenir le courant de démarrage requis. Durant le cycle de démarrage, le Variateur monte rapidement à la fréquence de démarrage. La fréquence est maintenue constante pendant un temps appelé "TEMPORISATION DE SYNCHRONISATION". Durant ce temps, le courant de sortie est limité à une valeur réglable appelée "I-LIMIT SYNC". Le moteur démarrera et tournera approximativement à la vitesse synchrone pour la fréquence de démarrage (10Hz= 600 tours/minute). A la fin de la "TEMPORISATION DE SYNCHRONISATION", le Variateur monte à une vitesse réglable jusqu'à la fréquence d'exploitation du système. [7]

La figure (II.12) indique l'effet du démarrage à fréquence plus basse sur la courbe couple-vitesse. La courbe se décale à gauche. Le démarrage est réalisé à basse fréquence, ce qui minimise l'effet de la charge constituée par la pompe, et la charge accélère à la fréquence d'exploitation, avec le moteur fonctionnant à droite du point du couple de décrochage sur la courbe couple-vitesse.

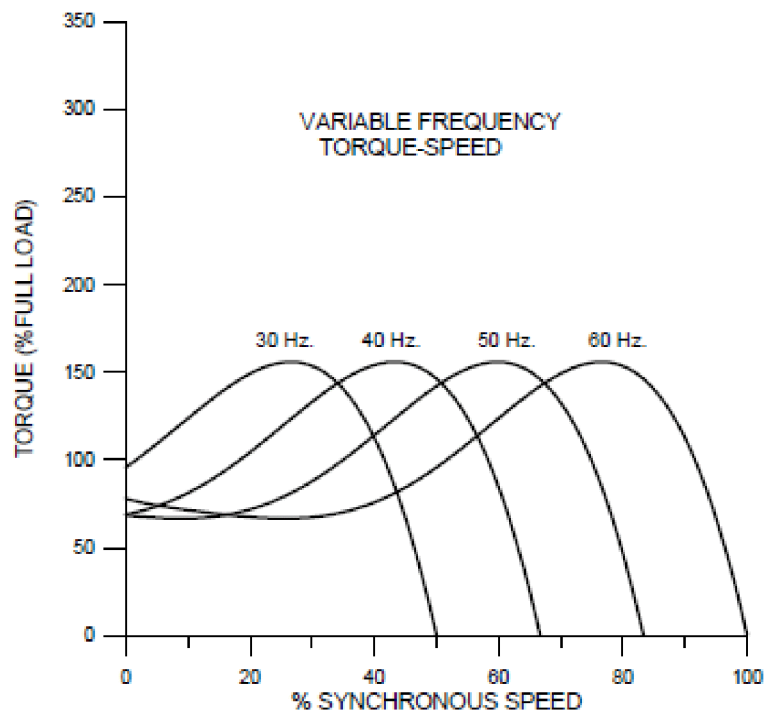


Figure II.12: courbe couple-vitesse

Bien qu'il ne soit généralement pas justifiable pour le démarrage seul, le démarrage à vitesse variable constitue la "meilleure" méthode disponible pour le démarrage d'une PCI.

Les problèmes examinés précédemment avec le moteur qui "s'accroche" à cause d'une trop grande chute de tension à ses bornes n'existent pas avec le démarrage à vitesse variable. Le Variateur isole la PCI du système d'alimentation électrique et compense la chute dans le câble situé en fond de puits, en permettant au démarrage à vitesse variable d'être le même dans pratiquement toutes les conditions.

Le choix du Variateur et du transformateur élévateur peut avoir un effet important sur le couple de démarrage disponible. Quel est le couple de démarrage suffisant ? On ne le sait jamais avant de pouvoir démarrer et c'est là que l'on sait qu'il n'est pas suffisant.

Le Variateur devrait avoir une valeur nominale élevée de courant de crête, car le couple est proportionnel au carré du courant. Le Variateur et le transformateur élévateur doivent être capables de fournir une capacité adéquate de Surtension pour obtenir le courant de démarrage maximum. La capacité de booster la tension de sortie au-delà de la tension de base pour la fréquence de démarrage permet au moteur de PCI à vitesse variable de développer des couples de démarrage plus élevés qu'au démarrage en DOL sur les systèmes ayant de grandes longueurs de câble. La Surtension peut être limitée par le Variateur ou par le transformateur élévateur. S'il est conçu correctement, le Variateur peut fournir une Surtension adéquate pour pratiquement n'importe quelle condition, sans incidence financière. Cependant, la capacité de surtension du transformateur élévateur a un effet important sur le coût, car il s'agit en effet d'une Surtension pour le transformateur à la fréquence de démarrage. Le transformateur doit être en mesure de supporter la Surtension sans augmentation significative du courant d'excitation. Pour le démarrage, le choix du Variateur devrait être basé sur la capacité de courant de crête de démarrage et celui du transformateur élévateur associé sur la capacité de Surtension. Le bon choix du Variateur et du transformateur élévateur assurera des démarrages fiables pendant toute la durée de vie de la pompe. [7]

**II.6.CONCLUSION**

Le démarrage est un élément critique dans l'application d'une PCI. Les caractéristiques de démarrage d'une pompe submersible sont influencées par une myriade de paramètres relatifs au système d'alimentation, à l'environnement du puits, au matériel de commande en surface, à la méthode de démarrage, au câble d'alimentation, à la pompe et au moteur. Le démarrage DOL doit être adopté lorsque c'est possible. Le démarrage à tension réduite devrait être envisagé pour les applications dans lesquelles les arbres sont chargés aux valeurs maximums et les câbles sont de courte longueur.

Les Variateurs de Vitesse assurent le démarrage le plus sûr dans les applications avec des PCI, car il commande totalement l'environnement électrique du moteur. La puissance de démarrage requise avec un Variateur est généralement plus basse que les exigences requises pour le fonctionnement à pleine charge, de sorte que le Variateur est idéal pour le fonctionnement à partir de petits générateurs. Les économies sur le générateur feront souvent plus que compenser le coût supplémentaire d'un Variateur.



**Chapitre III**

**Modélisation du moteur  
asynchrone**

### III.1 Introduction

Vu la forte utilisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil, et la présence de certaines contraintes qui nous pousse à ne pas utiliser de capteurs (à savoir la cherté de ces capteurs, inaccessibilité, et l'encombre des appareils), il serait un bon exemple d'application de la modélisation, de l'estimation et de la commande par observateur d'état.

Par définition, la modélisation d'un système consiste à prédire sa réponse à une excitation donnée. Le but alors est de trouver des relations mathématiques entre les variables d'entrée et de sortie. Afin de pouvoir développer de telles relations, on a maintenu l'ordre de modèle du système à quatre (4) dont on a supposé que le système est linéaire et non dépendant de la variation de la vitesse qui est prétendue fixe.

Au début du 20<sup>ème</sup> siècle et jusqu'aux années trente, la modélisation d'une machine électrique était basée sur l'élaboration de schémas équivalents dérivés de la théorie de champ transversal ou du champ tournant. Les équations présentées dans l'espace d'état permettent en outre de calculer la performance de la machine électrique en régime permanent à l'aide d'une formulation complexe, ou dans régime transitoire à l'aide d'une formulation opérationnelle. Ensuite, les méthodes matricielles d'analyse des machines sont développées et deviennent les bases pour les approches de la modélisation, de simulation, d'identification et de la commande. Cependant toutes ces théories qui conduisent à la machine généralisée ont été élaborées sous des hypothèses simplificatrices.

### III.2. Hypothèses simplificatrices

Les modèles de la machine asynchrone qui sont abordé dans ce chapitre s'appuient sur les principales hypothèses simplificatrices suivantes.

\*Le circuit magnétique n'est pas saturé, il est parfaitement feuilleté au stator et au rotor, seuls les conducteurs sont parcourus par des courants (les courants de Foucault sont négligés)

\*La densité du courant est uniformément répartie sur la section des conducteurs (l'effet de peau est négligé).

- \*Les paramètres ne varient pas avec la température.
- \*La force magnétomotrice créée par chaque phase des deux armatures est à répartition spatiale sinusoïdale le long de l'entrefer (on ne considère que le premier harmonique d'espace).
- \*Parfaite symétrie de la machine et entrefer lisse.

Il en résulte, des inductances propres constantes et des inductances mutuelles qui sont des fonctions sinusoïdales de l'angle que font les axes magnétiques.[9]

### III.3. Convention de signe

La machine asynchrone est surtout utilisée comme moteur, on adoptera alors les conventions de signe suivantes.

- \*Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif.
- \*Une f.é.m. positive fait circuler un courant positif.
- \*Le stator est considéré comme générateur, le rotor comme récepteur.
- \*Les angles et les vitesses de rotation sont comptés positivement dans le sens trigonométrique.

### III.4. Définition des angles

Il est à noter que les grandeurs rotoriques portent l'indice «  $r$  » et celles du stator l'indice «  $s$  ». L'angle électrique  $\theta$  indique la position du rotor par rapport au stator. Si  $\theta$  est nulle, l'enroulement de la phase «  $a_r$  » de la partie mobile se trouve aligné à l'enroulement «  $a_s$  » de la partie fixe. D'un point de vue magnétique, et avec les hypothèses posées, seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont fonction de l'angle  $\theta$  [1]. **[8]**

$$\begin{aligned}
(O_{as}, O_d) &= \theta_s & ; & & (O_{ar}, O_d) &= \theta_r \\
(O_{bs}, O_d) &= \theta_s - \frac{2\pi}{3} & ; & & (O_{br}, O_d) &= \theta_r - \frac{2\pi}{3} \\
(O_{cs}, O_d) &= \theta_s - \frac{4\pi}{3} & ; & & (O_{cr}, O_d) &= \theta_r - \frac{4\pi}{3}
\end{aligned} \tag{III.1}$$

On définit également :

$$(O_{as}, O_{ar}) = \theta_s - \theta_r = \theta \quad ; \quad (O_q, O_d) = \frac{\pi}{2}$$

### III.5. Equations de la machine asynchrone triphasée

#### III.5-1 Equations électriques

On applique la loi d'Ohm généralisée à chaque enroulement du système, nous obtenons :

$$\begin{aligned}
[v_s] &= \frac{d}{dt} [\varphi_s] + [R_s][i_s] \\
[v_r] &= \frac{d}{dt} [\varphi_r] + [R_r][i_r]
\end{aligned} \tag{III.2}$$

Avec :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}, \tag{III.3}$$

$$[R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}, [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

Où :

$$[v_s] = [v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs}]^t : \text{Tension instantanée aux bornes des enroulements statoriques.}$$

$$[v_r] = [v_{ar} \quad v_{br} \quad v_{cr}]^t : \text{Tension instantanée aux bornes des enroulements rotorique.}$$

$[\mathbf{i}_s] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^t$  : Courant dans les phases des enroulements statoriques.

$[\mathbf{i}_r] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^t$  : Courant dans les phases des enroulements rotoriques.

$[\boldsymbol{\varphi}_s] = [\varphi_{as} \ \varphi_{bs} \ \varphi_{cs}]^t$  : Flux totalisés instantanés traversant les enroulements statoriques.

$[\boldsymbol{\varphi}_r] = [\varphi_{ar} \ \varphi_{br} \ \varphi_{cr}]^t$  : Flux totalisés instantanés traversant les enroulements rotoriques.

### III.5-2 Equation des flux

Les flux totaux des phases statoriques et rotoriques s'expriment sous forme :

$$\begin{aligned} [\boldsymbol{\varphi}_s] &= [l_s][\mathbf{i}_s] + [M_{sr}][\mathbf{i}_r] \\ [\boldsymbol{\varphi}_r] &= [l_r][\mathbf{i}_r] + [M_{sr}][\mathbf{i}_s] \end{aligned} \quad (\text{III.4})$$

L'isotropie et la symétrie de la machine fait que les inductances propres des phases statoriques sont égales, il en est ainsi de même pour celles du rotor.

Les matrices «  $L_s$  » et «  $L_r$  » s'écrivent alors:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad \text{Et} \quad [l_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

$l_s, l_r$  : inductances propres statoriques et rotoriques ;

$m_s$  : inductance mutuelle entre phases statoriques ;

$m_r$  : inductance mutuelle entre phases rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles entre les phases du stator et du rotor dépend de la position angulaire  $\theta$  entre l'axe du stator et celui du rotor, elle s'écrit :

$$[M_{sr}] = m_s \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

$M_{sr}$  : inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

### III.5.3. Equation mécanique :

L'étude des régimes transitoires fait intervenir en plus des grandeurs électriques (tensions, courants), les grandeurs mécaniques (vitesse, couple, inertie, frottements). Lorsque la vitesse angulaire est constante, le couple résistant appliqué ( $\gamma$  compris celui des frottements) à l'arbre de la machine asynchrone est équilibré par le couple électromagnétique et l'équation d'équilibre des couples s'écrit :

$$\frac{Jd\Omega}{pdt} = C_{em} - C_r - C_f \quad (III.7)$$

$J$  : inertie de toutes les masses tournantes ramenées au rotor de la machine ;

$C_{em}$  : couple électromagnétique ;

$\Omega$  : vitesse angulaire mécanique du rotor ;

$C_f$  : couple dû aux frottements du système d'entraînement ;

$C_r$  : couple mécanique de la charge.

### III.5.4. Mise en équation de la machine asynchrone dans le système d'axes (d,q)

La matrice (II.5) des inductances mutuelles étant à éléments non constants, les coefficients des équations (II.1) et (II.2) sont variables, la résolution analytique de ce système d'équation se heurte à des difficultés insurmontables particulièrement, lors de l'étude des phénomènes transitoires. L'utilisation de la transformation de Park permet de contourner ce problème et d'obtenir un système d'équations à coefficients constants, ce qui facilite sa résolution. [9]

### III.6. Transformation de Park

La transformation de Park est une opération mathématique qui permet de passer d'un système triphasé quelconque ( $a, b, c$ ) décalés respectivement les un par rapport aux autres d'un angle électrique de  $\frac{2\pi}{3}$ , en un système à trois axes orthogonaux ( $d, q, o$ ). En fait, ce n'est rien d'autre qu'un changement de base pour les axes magnétiques du système.

La transformation directe est la suivante :

$$[p(\theta_s)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta_s) & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

$$[p(\theta_s)]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta_s - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

La transformation directe de Park s'écrit :

$$[X'_d, X'_q, X'_o] = [A][X'_a, X'_b, X'_c] \quad (\text{III.11})$$

Et la transformation inverse s'obtient :

$$[X'_a, X'_b, X'_c] = [A]^{-1}[X'_d, X'_q, X'_o] \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$[X'] = ([i], [v], [\varphi])$  où ces composantes sont respectivement le courant, la tension et le flux.

Dans le cas où le neutre de la machine n'est pas relié ( $i_a + i_b + i_c = 0$ ), la composante homopolaire d'indice « o » est nulle après transformation de Park.

Les repères (dq) de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations, ceci se fait en liant les angles par la relation (II.11):

$$\theta = \theta_s - \theta_r$$

Ce qui permet d'écrire la relation suivant :

$$\omega = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta}{dt}$$

### III.6.1 Modèle du moteur asynchrone exprimé dans le repère (dq)

#### III.6.1.a) Equations électriques

En reprenant les équations et les résultats précédents, il vient avec des notations condensées :

$$\begin{aligned} [\mathbf{v}_s] &= [R_s][\mathbf{i}_s] + \frac{d}{dt}[\boldsymbol{\varphi}_s] \\ [\mathbf{v}_{sp}] &= [R_s][\mathbf{i}_{sp}] + \frac{d}{dt}[\boldsymbol{\varphi}_{sp}] \\ [p(\theta_s)][\mathbf{v}_s] &= [R_s][p(\theta_s)][\mathbf{i}_s] + \frac{d}{dt}[\boldsymbol{\varphi}_s][p(\theta_s)] \end{aligned} \quad (\text{III.13})$$

On notera :

$(V_{sp})$ , vecteur tension, où l'indice  $p$  indique ici la nouvelle base de Park.

$(V_{sp}) = (V_d, V_q, V_o)$   $t$ , sont les composantes du vecteur dans le repère de Park.

En multipliant les deux membres de l'équation (II.12) par  $[p(\theta_s)]$ , il vient :

$$[p(\theta_s)][\mathbf{v}_{sp}] = [R_s][p(\theta_s)][\mathbf{i}_{sp}] + \left(\frac{d}{dt}[\boldsymbol{\varphi}_{sp}][p(\theta_s)]\right) \quad (\text{III.14})$$

En multipliant une autre fois par  $[p(\theta_s)]^{-1}$ , on trouve :

$$[\mathbf{v}_{sp}] = [R_s][\mathbf{i}_{sp}] + [p(\theta_s)]^{-1} \left(\frac{d}{dt}[\boldsymbol{\varphi}_{sp}][p(\theta_s)]\right) = [R_s][\mathbf{i}_{sp}] + \frac{d}{dt}[\boldsymbol{\varphi}_{sp}] + [p(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt}[\boldsymbol{\varphi}_{sp}][p(\theta_s)] \quad (\text{III.16})$$

Le développement du dernier terme de la somme est :

$$\frac{d}{dt}[p(\theta_s)] \cdot \begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{so} \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \frac{d\theta_s}{dt} \begin{pmatrix} -\sin(\theta_s) & -\cos(\theta_s) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{so} \end{pmatrix} \quad (\text{III.18})$$

$$= \frac{2}{3} \omega_s \begin{pmatrix} -\sin(\theta_s)\varphi_{sd} & -\cos(\theta_s)\varphi_{sq} & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3})\varphi_{sd} & -\cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3})\varphi_{sq} & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3})\varphi_{sd} & -\cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3})\varphi_{sq} & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.19})$$

En effectuant la multiplication des matrices, on trouve :

$$[p(\theta_s)]^{-1} \cdot \frac{d}{dt}[p(\theta_s)] \cdot (\varphi_{sp}) = \omega_s \begin{pmatrix} -\varphi_{sq} \\ \varphi_{sd} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.20})$$

$$[v_{sp}] = [R_s][i_{sp}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{sp}] + \omega_s \begin{pmatrix} -\varphi_{sq} \\ \varphi_{sd} \\ 0 \end{pmatrix}$$

D'où le résultat final :

$$(\text{III.21})$$

Le développement des composantes de PARK pour le stator :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} - \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

On aura les mêmes équations au rotor en changeant partout l'indice «s» en «r» et en annulant les tensions puisque le rotor est en court circuit:

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - \omega \varphi_{rq} \\ 0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} - \omega \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

### III.6.1.b) Equations des flux

$$[p(\theta_s)](\varphi_{sp}) = [L_s][p(\theta_s)](i_{sp}) + [M_{sr}][p(\theta)](i_{rp}) \quad (\text{III.24})$$

En multipliant par  $[p(\theta_s)]^{-1}$ , il vient :

$$(\varphi_{sp}) = [p(\theta_s)]^{-1} [L_s][p(\theta_s)](i_{sp}) + [p(\theta_s)]^{-1} [M_{sr}][p(\theta)](i_{rp}) \quad (\text{III.25})$$

Le produit matriciel  $[p(\theta_s)]^{-1} [L_s][p(\theta_s)]$  donne la nouvelle matrice suivante :

$$\begin{pmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2m_s \end{pmatrix} \quad (\text{III.26})$$

En exploitant la relation (II.11), qui est obtenue du fait que les axes de PARK sont coïncidés pour le stator ainsi pour le rotor le produit  $[p(\theta_s)]^{-1} [M_{sr}][p(\theta_s)]$  est égale :

$$[p(\theta_s)]^{-1} [M_{sr}][p(\theta_s)] = \frac{3}{2} m_{sr} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (\text{III.27})$$

Les équations magnétiques pour le stator et le rotor compte tenue des résultats obtenus ci-dessus sont récapitulées dans le système matriciel suivant:

$$\begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{rd} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{pmatrix} \quad (\text{III.28})$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{sq} \\ \varphi_{rq} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{pmatrix}$$

On définit pour ces équations :

$L_s = l_s - m_s$  : Inductance propre cyclique du stator ;

$L_r = l_r - m_r$  : Inductance propre cyclique du rotor ;

$M_{sr} = \frac{3}{2} m_s$  : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor ;

### III.6.1.c) Schéma équivalent de la machine asynchrone dans le repère dq

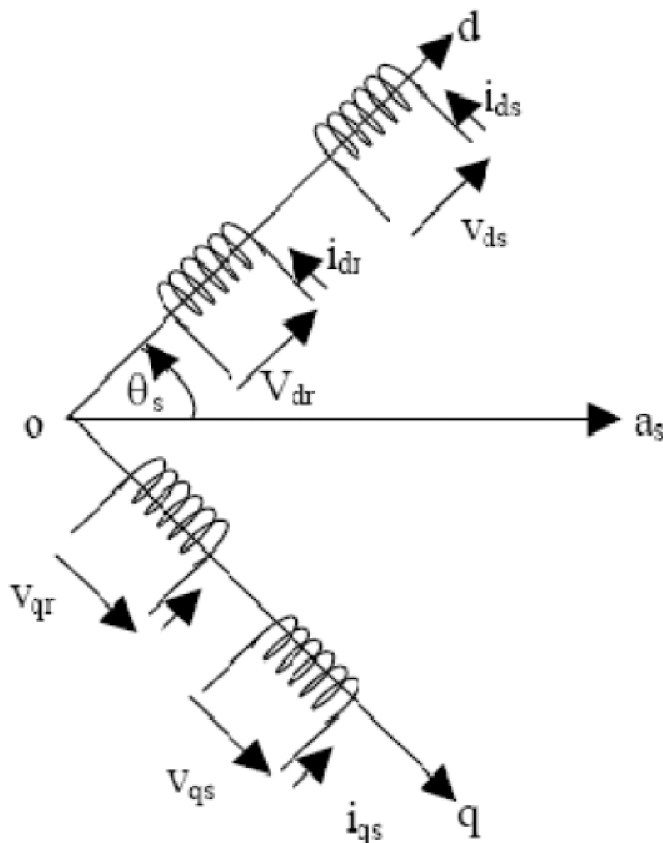


Figure (III.1) : schéma équivalent de la machine asynchrone dans le plan dq.

### III.6.1.d) Expression du couple électromagnétique dans le plan dq

Elle est déduite à partir de la puissance électromécanique qui s'écrit :

$$p_e = \frac{3}{2} (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \left( \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \right) = \frac{3}{2} (\varphi_{sd} i_{sd}) \omega \quad (\text{III.29})$$

D'où le couple électromécanique qui est le rapport de la puissance électromagnétique sur la vitesse :

$$C_{em} = \frac{3}{2} (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{III.30})$$

Dans le cas d'une machine à plusieurs paires de pôles, le couple s'exprime par la même relation précédente en introduisant cette fois ci le nombre de paires de pôles p :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \quad (\text{III.31})$$

### III.7 Choix du référentiel de travail

Le référentiel de travail est le système (od, oq) associé à la vitesse de rotation choisie pour lui. En pratique, trois référentiels sont intéressants, le choix de ces derniers se fait en fonction de l'application. Dans les paragraphes précédents nous avons déjà défini la vitesse de rotation du rotor  $\omega$ , la vitesse du champ tournant ou pulsation des courants statoriques  $\omega_s$  ainsi la pulsation des courants rotoriques ( $g\omega_s$ ). Ce changement de référentiel concerne seulement les équations électriques de la machine. [9]

#### III.7.1 Référentiel lié au stator

Il est utilisé de préférence pour étudier des variations importantes de la vitesse de rotation associées au non avec des variations de fréquence d'alimentation Cela se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{Et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad (\text{III.32})$$

#### III.7.2 Référentiel lié au rotor

Il est employé dans les problèmes de régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée comme constante (exemple : l'étude des contraintes résultant d'un court-circuit).

Cela se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta}{dt} = \theta_s \quad \text{Et} \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (\text{III. 32})$$

$$\begin{cases} v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - g \omega_s \varphi_{rq} \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} - g \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

### III.7.3 Référentiel lié au champ tournant

Cela se traduit par le système relations suivant :

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_s}{dt} &= \omega_s \\ \frac{d\theta}{dt} &= \omega \\ \frac{d\theta_r}{dt} &= \omega_r = g\omega_s \end{aligned} \quad (\text{III.34})$$

Ce référentiel est le seul qui n'introduit pas de simplifications dans la formulation des équations mais il est particulièrement avantageux dans le cas où la fréquence est constante. Il est très souvent utilisé même dans l'étude des moteurs asynchrones à fréquence variable, lorsque nous nous intéressons à de petites perturbations autour d'un point de fonctionnement. [9]

Pour le stator :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} - \omega_s \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.35})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - \omega_r \varphi_{rq} \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} - \omega_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

Pour les flux :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{rd} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{pmatrix} \quad (\text{III. 37})$$

$$\begin{pmatrix} \varphi_{sq} \\ \varphi_{rq} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{pmatrix}$$

En introduisant les équations des flux dans les lois des mailles précédentes, le modèle final de Park du moteur asynchrone comprend deux équations principales pour le stator et pour le rotor, la dernière est moins d'importance car on s'arrange pour que la composante homopolaire soit nulle. On donnera :

Pour le stator :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{d}{dt} i_{sd} + Lm \frac{d}{dt} i_{rd} - \omega_s (L_s i_{sq} + Lm i_{rq}) \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{d}{dt} i_{sq} + Lm \frac{d}{dt} i_{rq} - \omega_s (L_s i_{sd} + Lm i_{rd}) \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

Et pour le rotor :

$$\begin{cases} v_{rd} = 0 = R_r i_{rd} + L_r \frac{d}{dt} i_{rd} + Lm \frac{d}{dt} i_{sd} - g \omega_s (L_r i_{rq} + Lm i_{sq}) \\ v_{rq} = 0 = R_r i_{rq} + L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + Lm \frac{d}{dt} i_{sq} - g \omega_s (L_r i_{rd} + Lm i_{sd}) \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

### III.8. Simulation et interprétation

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels MATLAB/SIMULINK, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires. Dans ce travail, nous présenterons le principe de modélisation et de simulation d'une machine électrique : le moteur asynchrone à cage d'écureuil.

Ce dernier, grâce aux nombreux avantages qu'il procure par rapport aux autres types de moteurs électriques, s'est imposé comme le moteur de premier choix dans les mécanismes industriels.

#### III.8.1. Introduction à Matlab et simulink

Le logiciel Simulink de Math Works est destiné à la simulation de systèmes dynamiques. C'est une extension du logiciel MATLAB du même fournisseur. Simulink se caractérise par le fait que les modèles étudiés peuvent être introduits sous forme de schémas-blocs créés et édités par des commandes générées principalement à l'aide de la souris. C'est donc un logiciel de simulation numérique travaillant à partir d'un schéma de type analogique.

Un schéma Simulink est constitué par un certain nombre de blocs reliés entre eux par des lignes orientées dans le sens de circulation du signal. Les blocs utilisés peuvent être soit pris dans une bibliothèque standard, soit créés par l'utilisateur. La figure 1 montre quelques blocs tirés de la bibliothèque standard.

Sur la première ligne, on trouve des générateurs de signaux, dont une horloge permettant de donner les valeurs du temps

Le deuxième groupe comprend des éléments capables de réaliser des opérations (somme, produit, multiplication par une constante, intégration, etc...).

Le deuxième groupe comprend des éléments capables de réaliser des opérations (Somme, produit, multiplication par une constante, intégration, etc...).

La troisième ligne est consacrée à deux éléments pouvant enregistrer le signal.

L'oscilloscope permet d'observer la progression de grandeur

Les blocs peuvent être ouverts en cliquant deux fois sur leur icône. Il apparaît alors généralement une fenêtre de dialogue dans laquelle on peut donner, sous forme analytique ou numérique, les

caractéristiques de l'élément. Si cela est fait sous forme analytique, les grandeurs utilisées doivent être définies dans un fichier MATLAB.

Il est intéressant de noter pour la suite que c'est dans la fenêtre de dialogue des intégrateurs que l'on donne les conditions initiales.

Une fois le modèle défini, on intervient dans le menu SIMULATION pour définir les paramètres du calcul (temps initial et final, pas d'intégration, précision, méthode utilisée).

Les tensions d'alimentations sont comme suit :

$$\begin{aligned} v_{as} &= v_{\max} \sin(\omega(t)) \\ v_{bs} &= v_{\max} \sin(\omega(t) - 2\tau/3) \\ v_{cs} &= v_{\max} \sin(\omega(t) - 4\tau/3) \end{aligned} \quad (\text{III.40})$$

Les tensions biphasées dans l'équation (2) sont obtenues comme suit :

$$\begin{aligned} v_{sd} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left( v_{as} - \frac{1}{2} v_{bs} - \frac{1}{2} v_{cs} \right) \\ v_{sq} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \sqrt{\frac{3}{2}} v_{bs} - \sqrt{\frac{3}{2}} v_{cs} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.41})$$

Les équations de transformation inverse des courants statoriques sont :

$$\begin{aligned} i_{as} &= \sqrt{\frac{2}{3}} (i_{sd}) \\ i_{bs} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left( -\frac{1}{2} i_{sd} + \sqrt{\frac{3}{2}} i_{sq} \right) \\ i_{cs} &= \sqrt{\frac{2}{3}} \left( -\frac{1}{2} i_{sd} - \sqrt{\frac{3}{2}} i_{sq} \right) \end{aligned} \quad (\text{III.42})$$

Model de Park du moteur asynchrone référentiel lié au champ tournant:

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_{dr}}{dt} &= -g \cdot \omega \cdot \phi_{qr} - \frac{1}{Tr} \phi_{dr} + \frac{Lm}{Tr} ids \\ \frac{d\phi_{qr}}{dt} &= -g \cdot \omega \cdot \phi_{dr} - \frac{1}{Tr} \phi_{qr} + \frac{Lm}{Tr} iqs \end{aligned} \quad (\text{III.43})$$

$$\begin{aligned} \frac{di_{ds}}{dt} &= \frac{Lm}{Ls.Lr.\sigma Tr} \cdot \varphi_{dr} - \frac{Lm.\omega_r}{Ls.Lr.\sigma} \varphi_{qr} - \left( \frac{Rs}{\sigma.Ls} + \frac{Lm^2}{Ls.Lr.\sigma Tr} \right) i_{ds} - \omega.i_{qs} + \frac{1}{\sigma.Ls} \cdot v_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} &= \frac{Lm}{Ls.Lr.\sigma Tr} \cdot \varphi_{qr} - \frac{Lm.\omega_r}{Ls.Lr.\sigma} \varphi_{dr} - \left( \frac{Rs}{\sigma.Ls} + \frac{Lm^2}{Ls.Lr.\sigma Tr} \right) i_{qs} + \omega.i_{ds} + \frac{1}{\sigma.Ls} \cdot v_{qs} \end{aligned} \quad (\text{III.44})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \sigma &= 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \quad \text{Coefficient de dispersion ;} \\ T_r &= \frac{L_r}{R_r} \quad \text{Constante de temps rotorique.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_{em} &= p \cdot \frac{Lm}{Lr} (\varphi_{dr} \cdot i_{qs} - \varphi_{qr} \cdot i_{ds}) \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{J}{p} (C_{em} - C_r - f_r \cdot \omega_r) \end{aligned} \quad (\text{III.45})$$

### III.8.2. Déclaration des Paramètres :

$$V_{\max} = 220/380 \text{ [V]}$$

$$I_n = 6.3/3.7 \text{ [A]}$$

$$P_n = 3 \text{ [kW]}$$

$$p = 1$$

$$L_s = 0.274 \text{ [h]}$$

$$R_s = 4.85 \text{ [\Omega]}$$

$$R_r = 3.805 \text{ [\Omega]}$$

$$L_r = 0.274$$

$$K_f = 0.008$$

$$J = 0.031$$

$$C_r = 0 \text{ [N.m]} \text{ pour essai a vide et } 5 \text{ [N.m]} \text{ pour essai en charge.}$$

$$T_s = L_s / R_s$$

$$T_r = L_r / R_r$$

$$L_m = 0.258 \text{ [h]}$$

$$\text{Sigma} = 1 - ((L_m * L_m) / (L_s * L_r))$$

$$f = 50 \text{ [Hz]}$$

$$W = 2 * \pi * f \text{ [rad/s]}$$

III.8. 3.model sur simulink

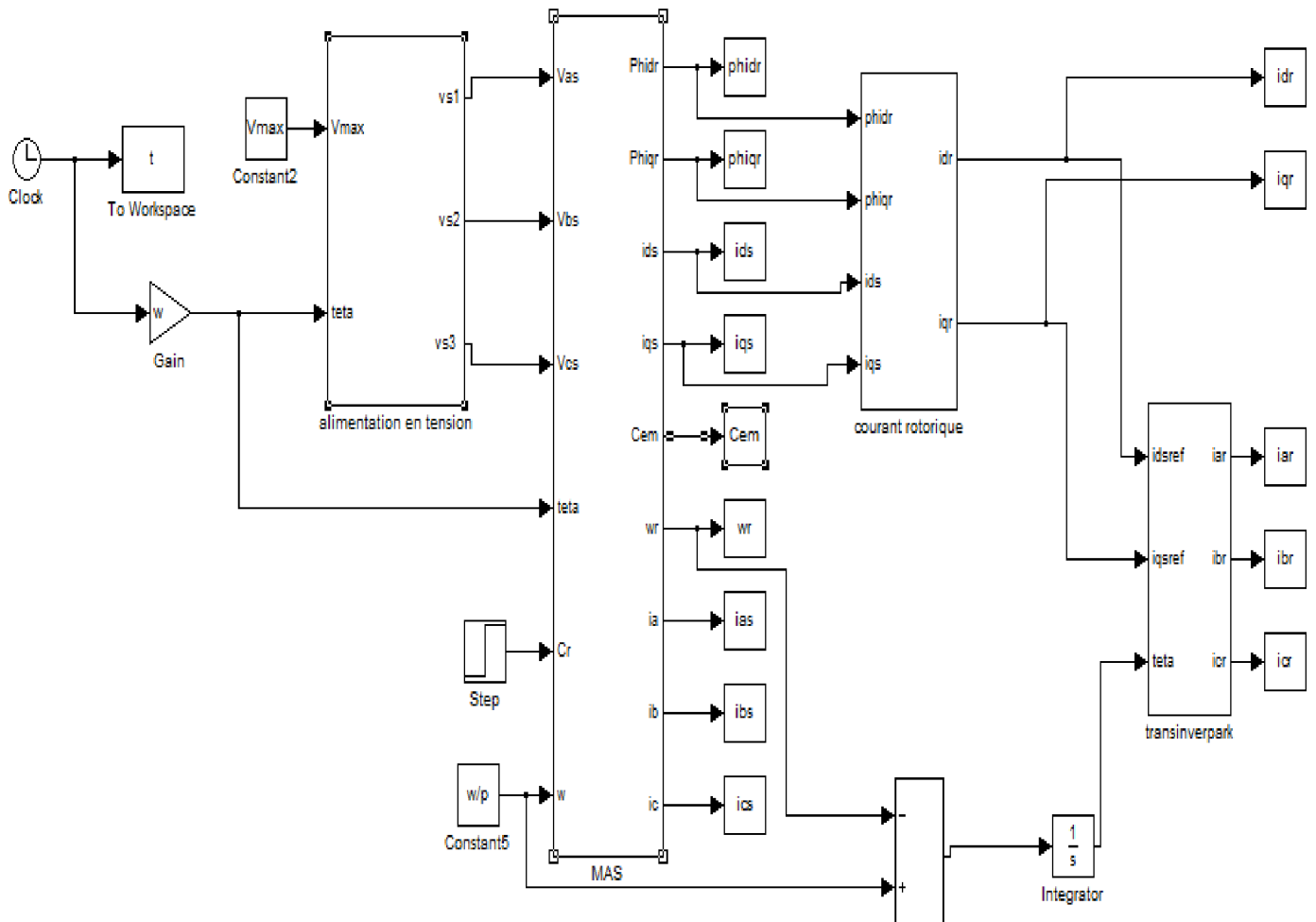


Figure III.2 : schéma bloc du model moteur asynchrone alimenté en tension.

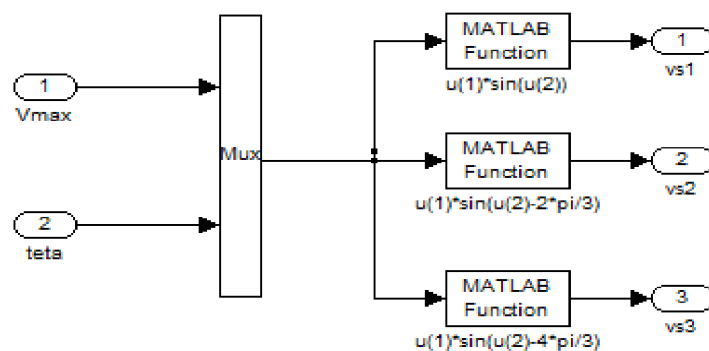


Figure III.3: schéma de simulation du bloc alimentation.

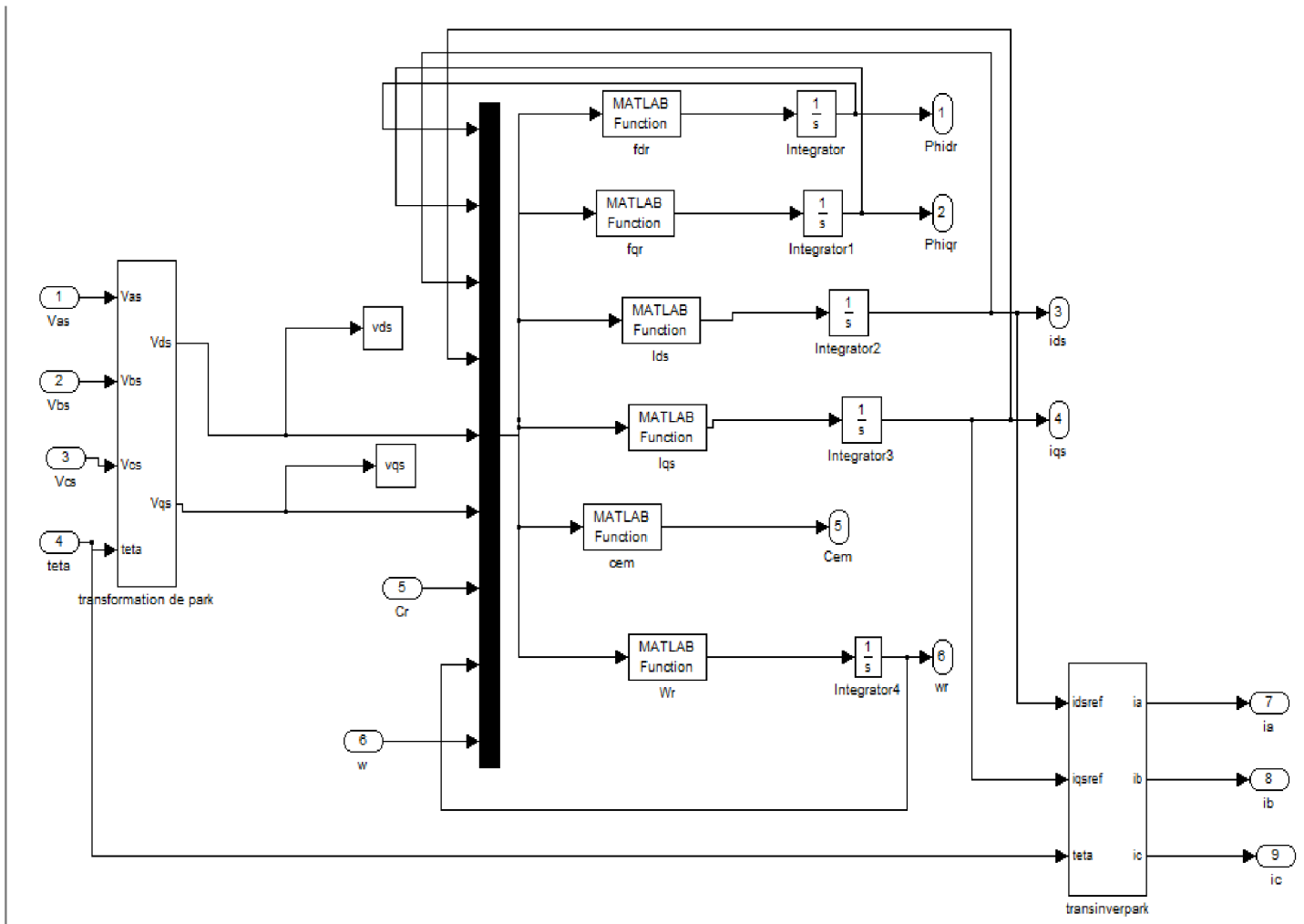


Figure III.4 : schéma de simulation du bloc MAS.

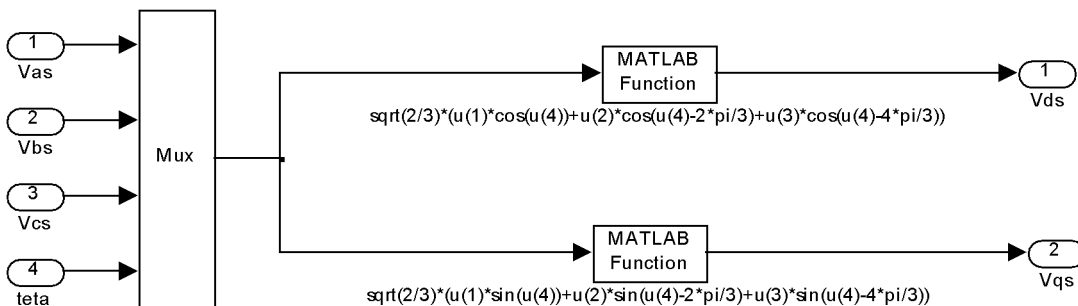
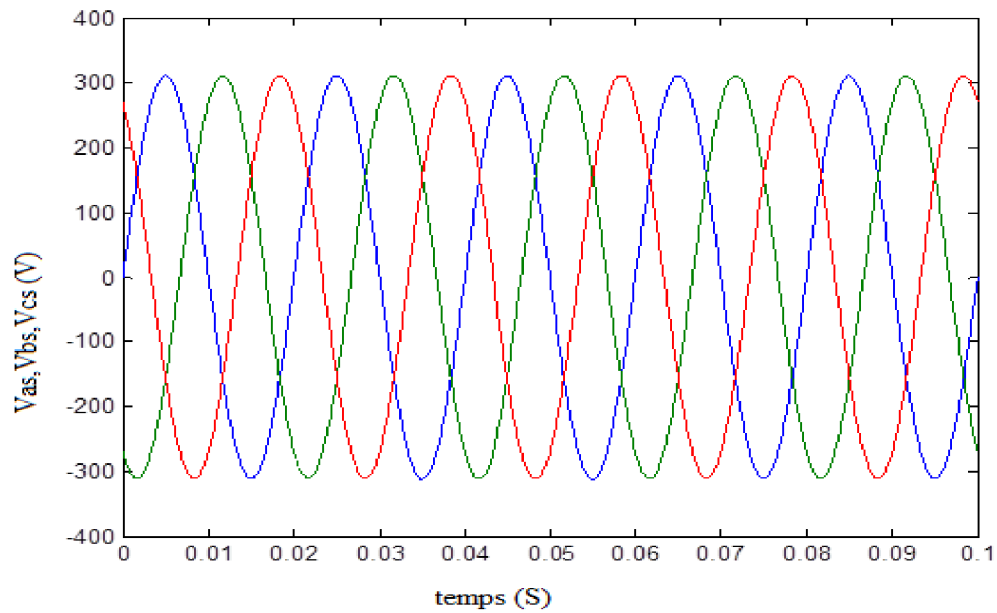
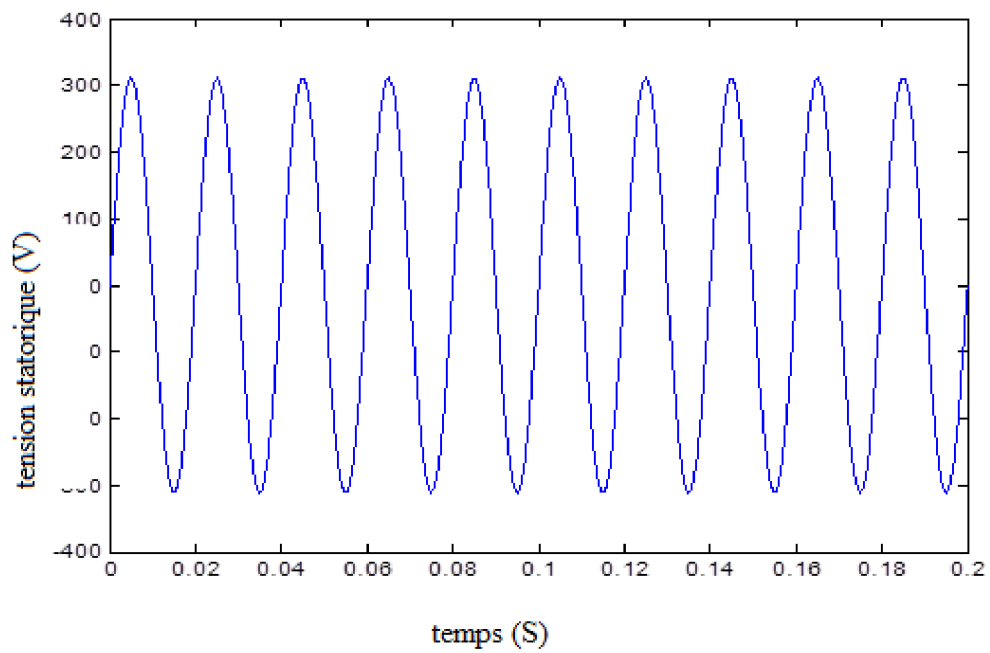
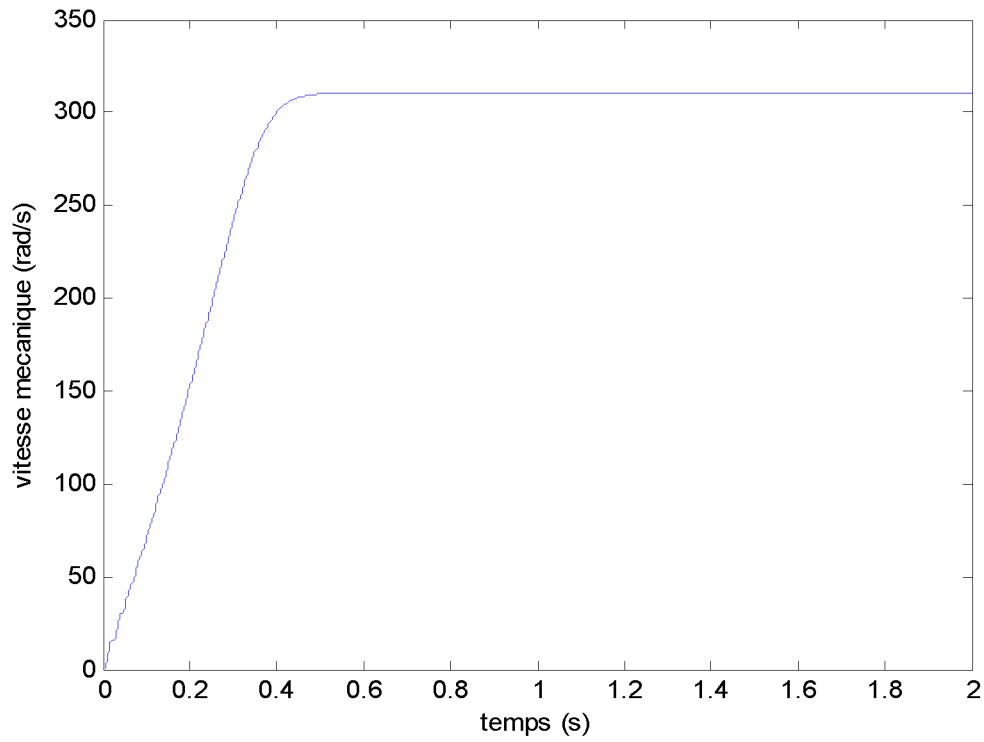
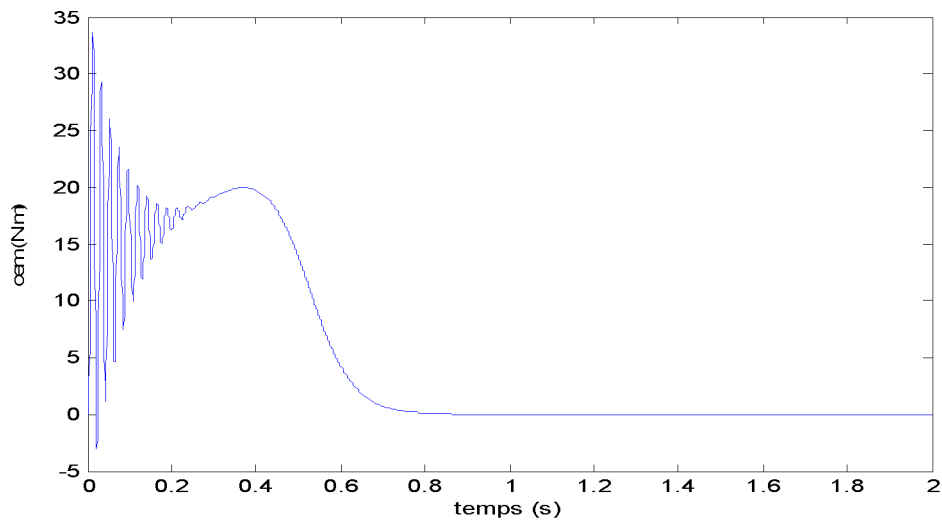


Figure III.5 : schéma de simulation du bloc transformation de Park.

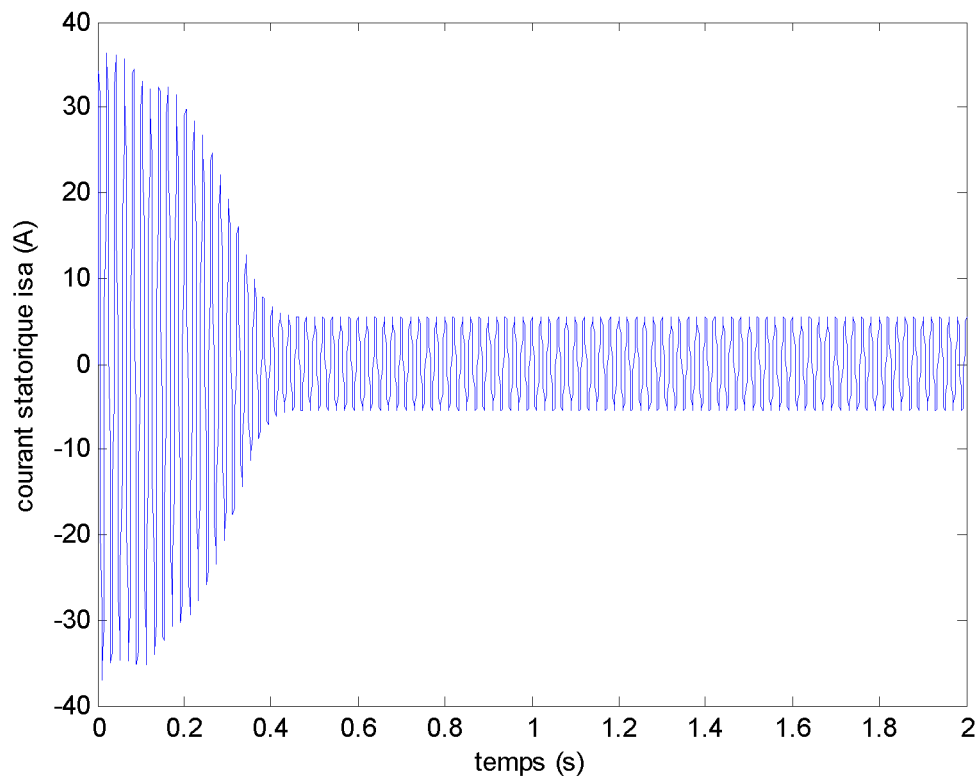
**III.8.4.les résultats de la simulation d'un Démarrage à vide ( $C_r=0$  N .m) :****Figure III.6 :** le déphasage entre les trois tensions d'alimentation.**Figure III.7 :** la tension statorique.



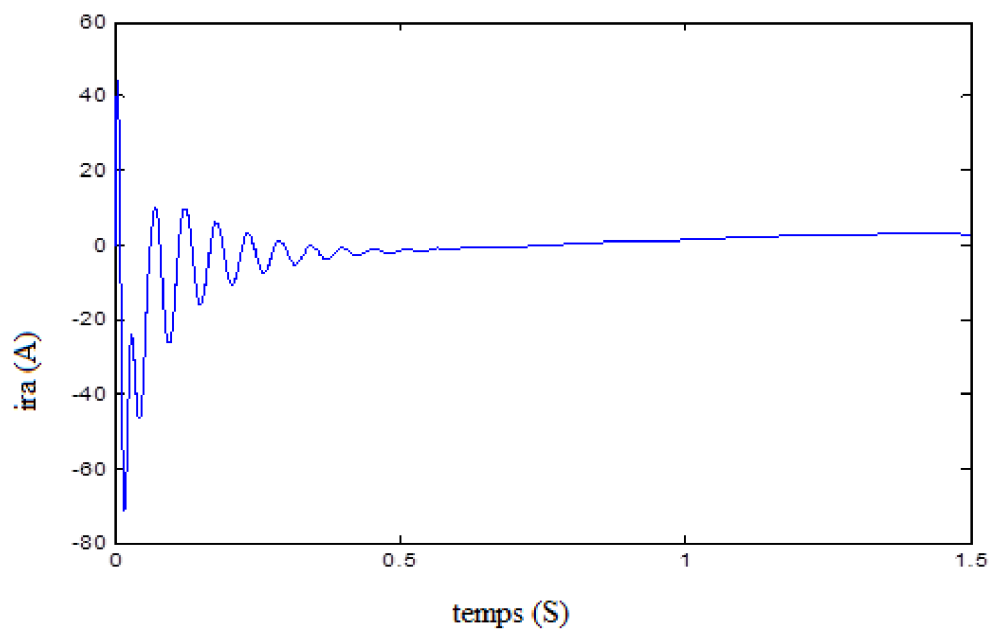
**Figure III.8:** la vitesse de rotation  $W_r$ .



**Figure III.9:** Couple électromagnétique  $C_{em}$  sans charge.



**Figure III.10:** Courant statorique  $I_{sa}$  a vide.



**Figure III.11:** courant rotorique  $I_{ra}$  à vide.

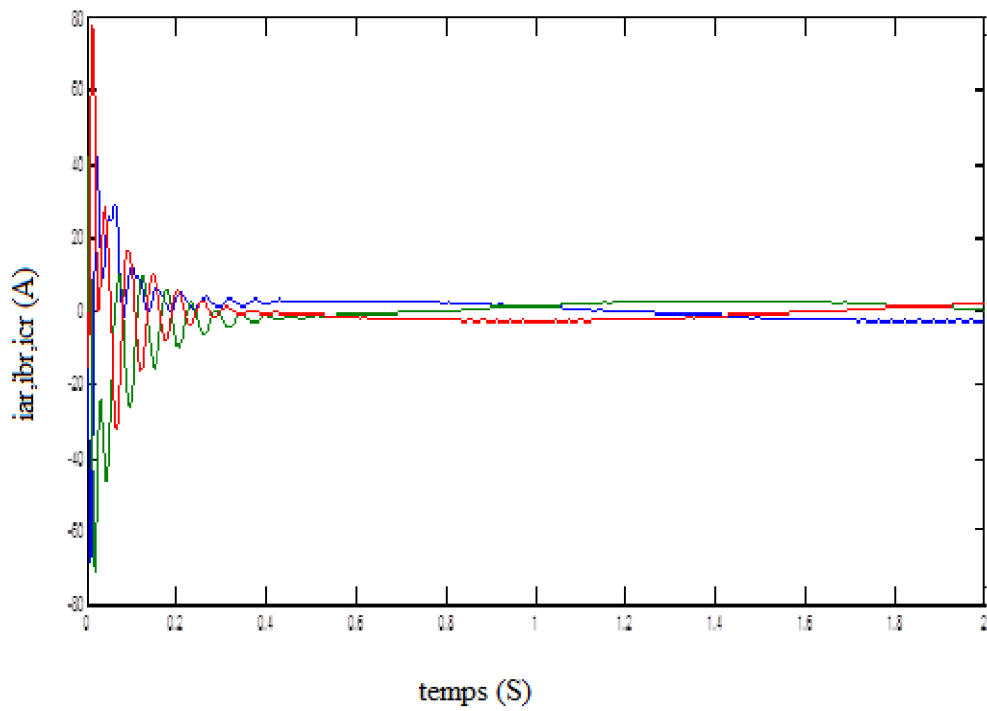


Figure III.12 : les trois courants rotoriques.

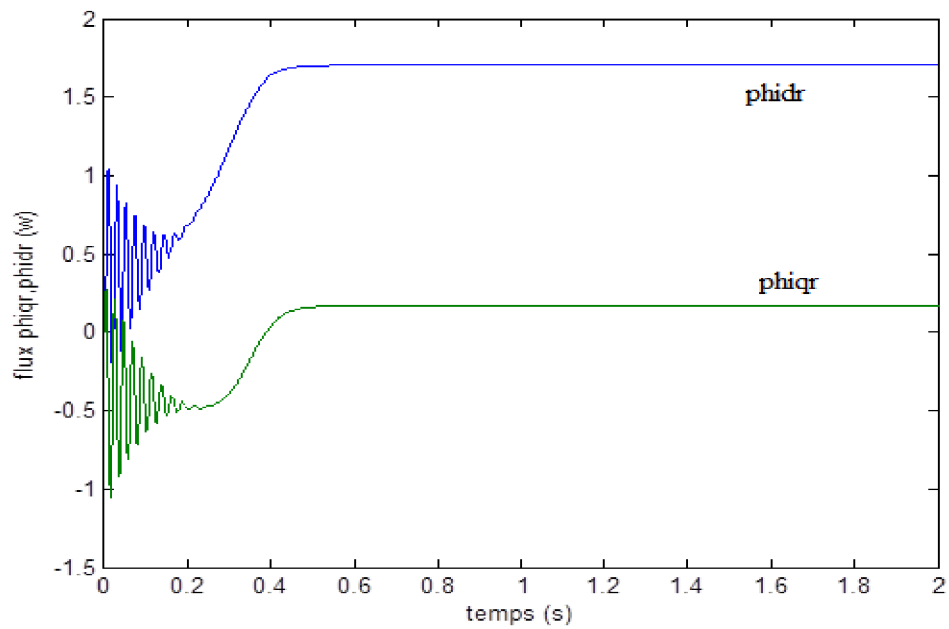
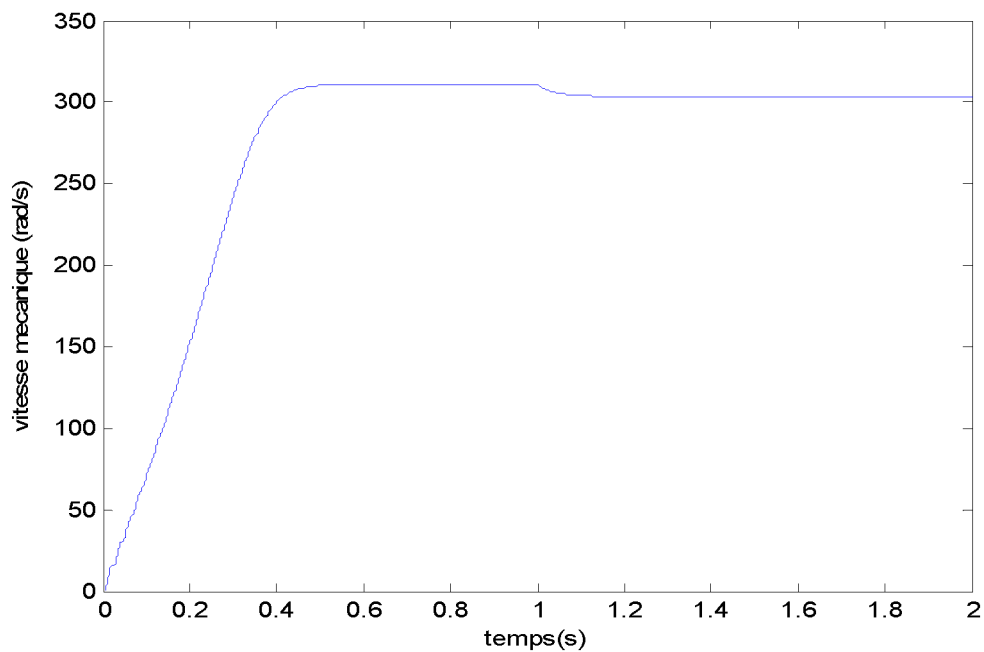
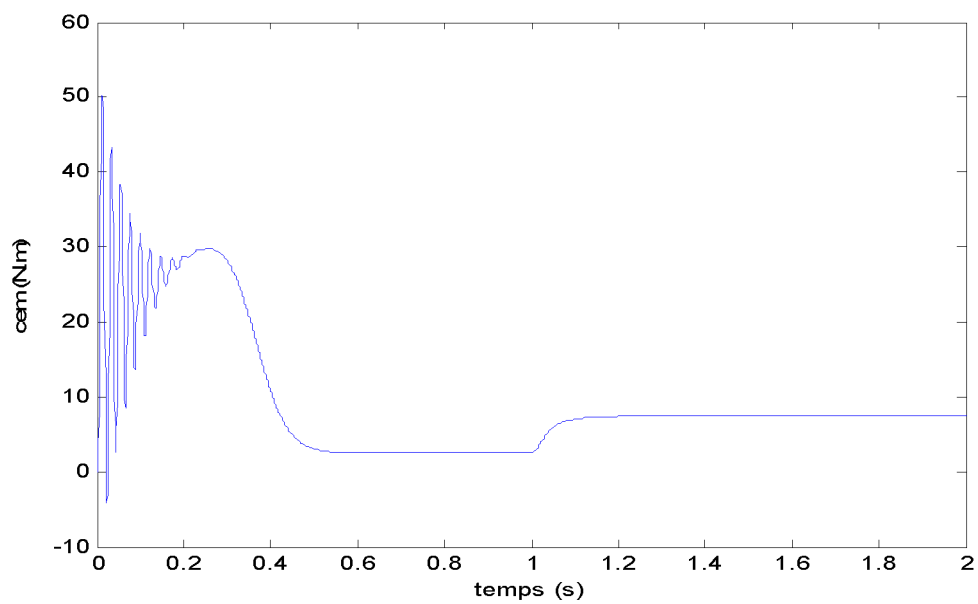
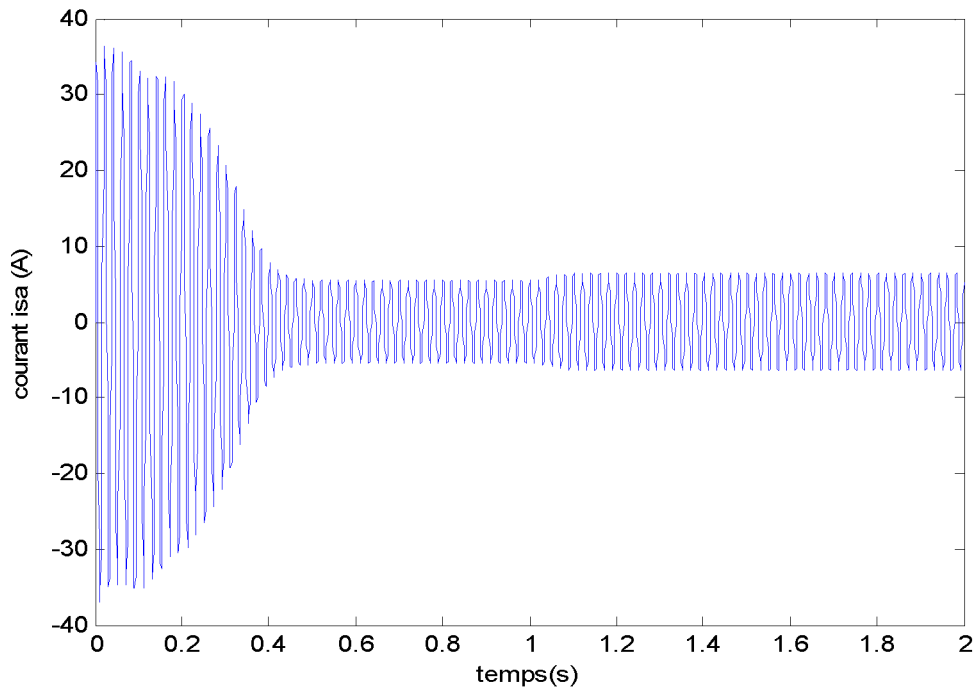
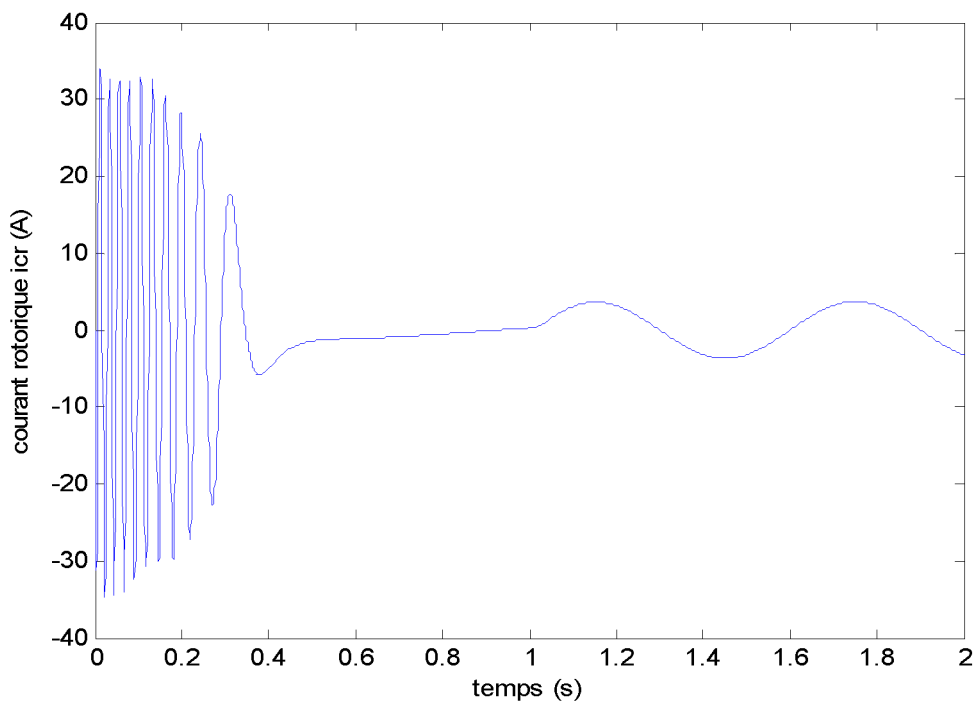


Figure III.13 : les flux  $\phi_{iqr}, \phi_{idr}$

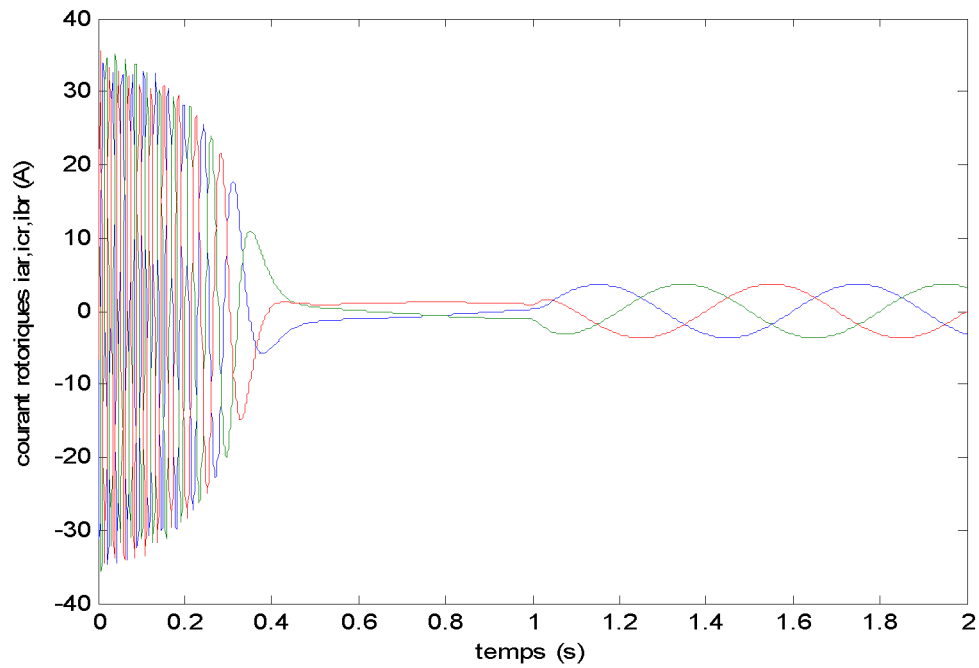
**III.8.5.les résultats de la simulation d'un Démarrage à charge ( $C_r=5 \text{ N.m}$ )****III.8.5.a) application une charge de 5 (N.m) à l' instant ( $t=1\text{S}$ )****Figure III.14:** la vitesse de rotation  $W_r$  en charge.**Figure III.15:** Couple électromagnétique  $C_{em}$  en charge.



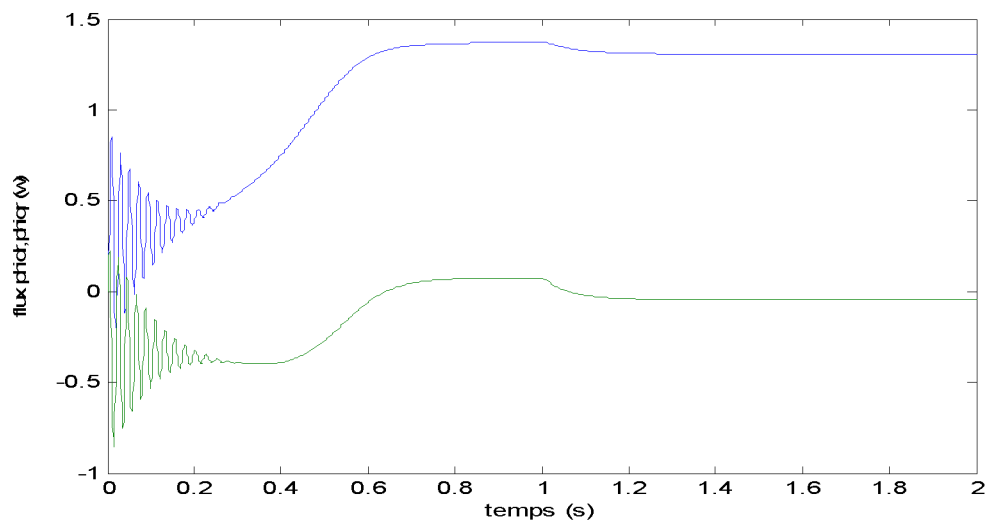
**Figure III.16:** Courant statorique  $i_{sa}$  en charge.



**Figure III.17:** Courant rotorique  $i_{cr}$  en charge.



**Figure III.18 :** les trois courants rotoriques



**Figure III.19:** les deux flux rotorique  $\phi_{idr}$ ,  $\phi_{iqr}$  a charge

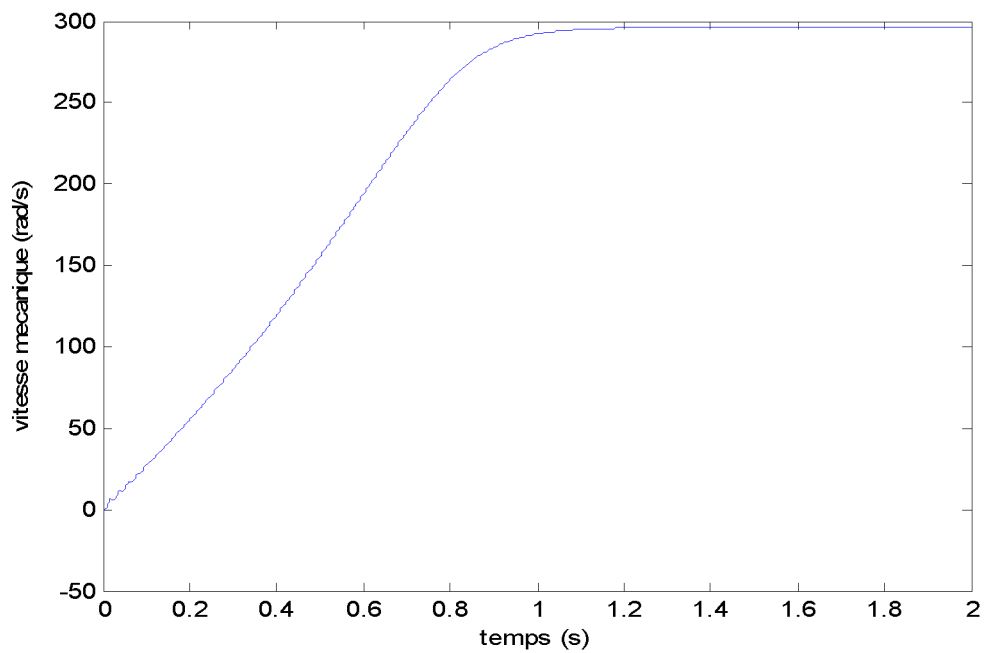
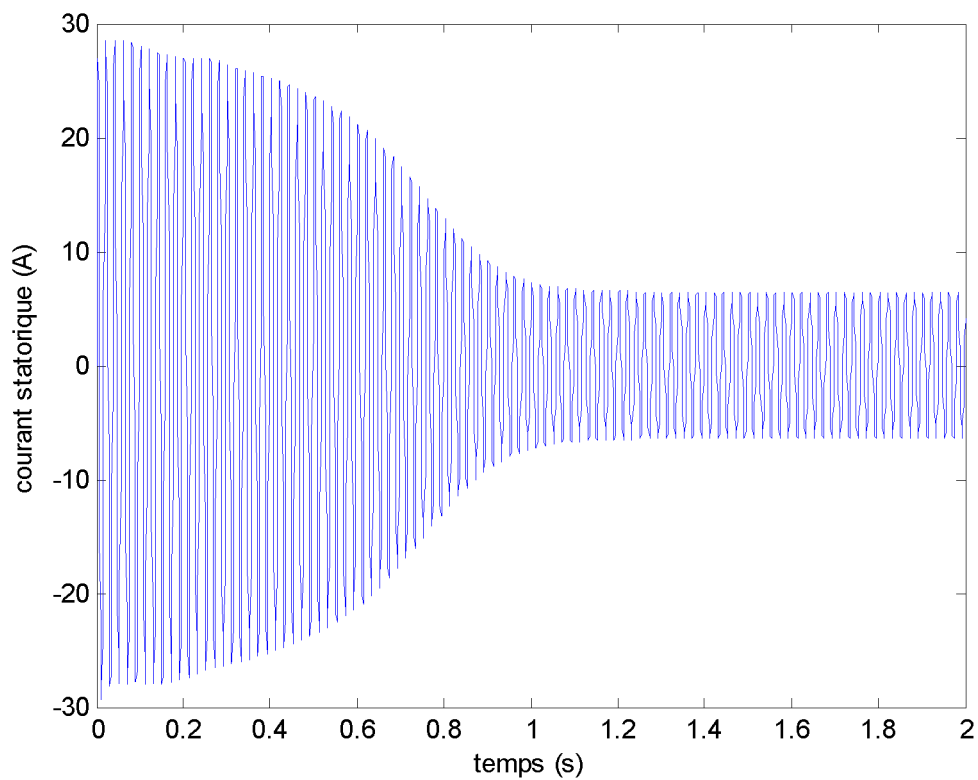
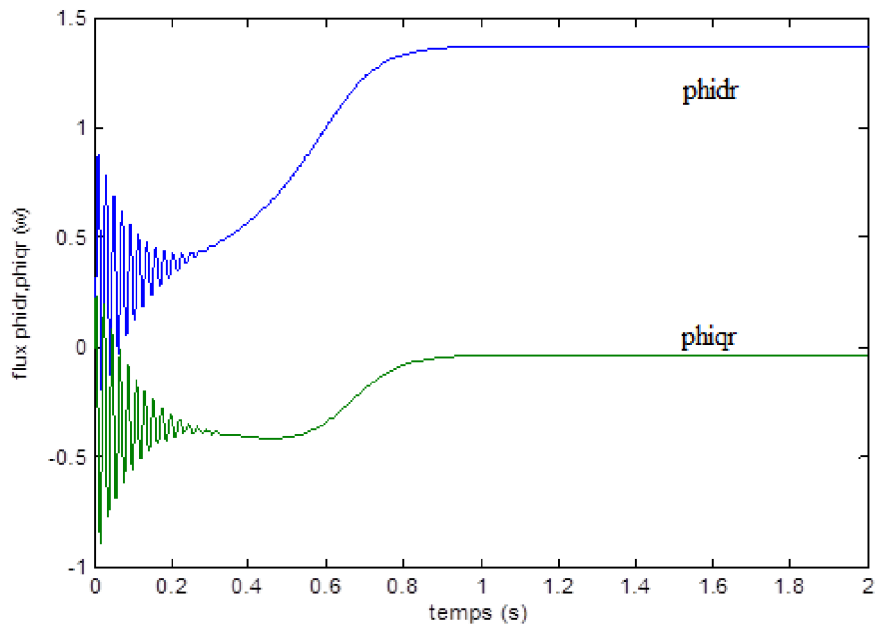
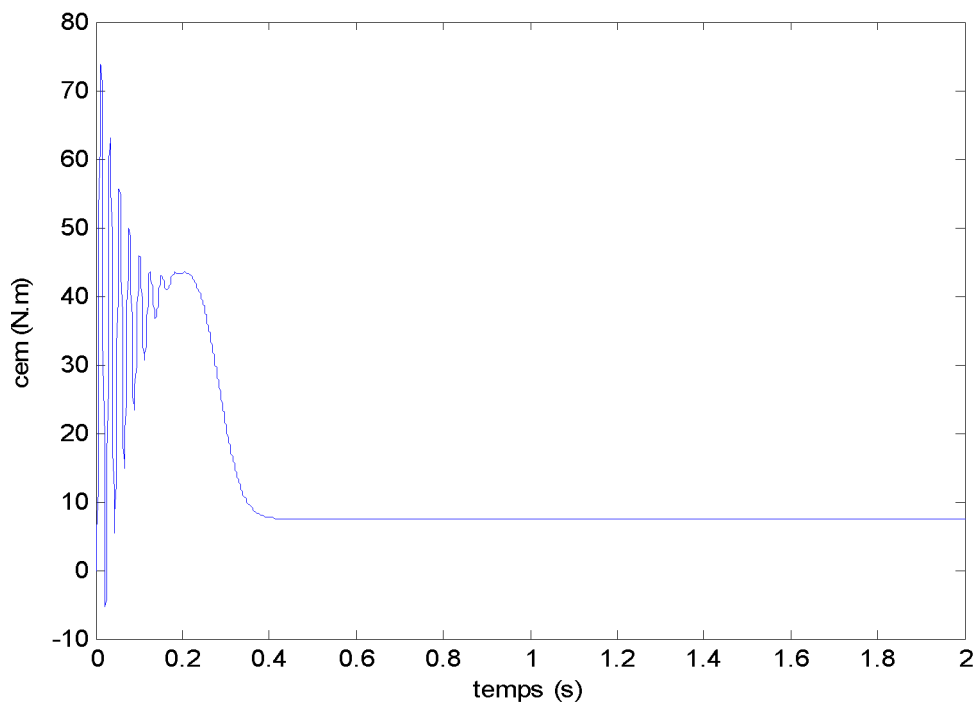
III.8.5.b) application une charge de 5 (N.m) à l' instant ( $t=0$ S)Figure III.20: la vitesse de rotation  $W_r$  en charge.

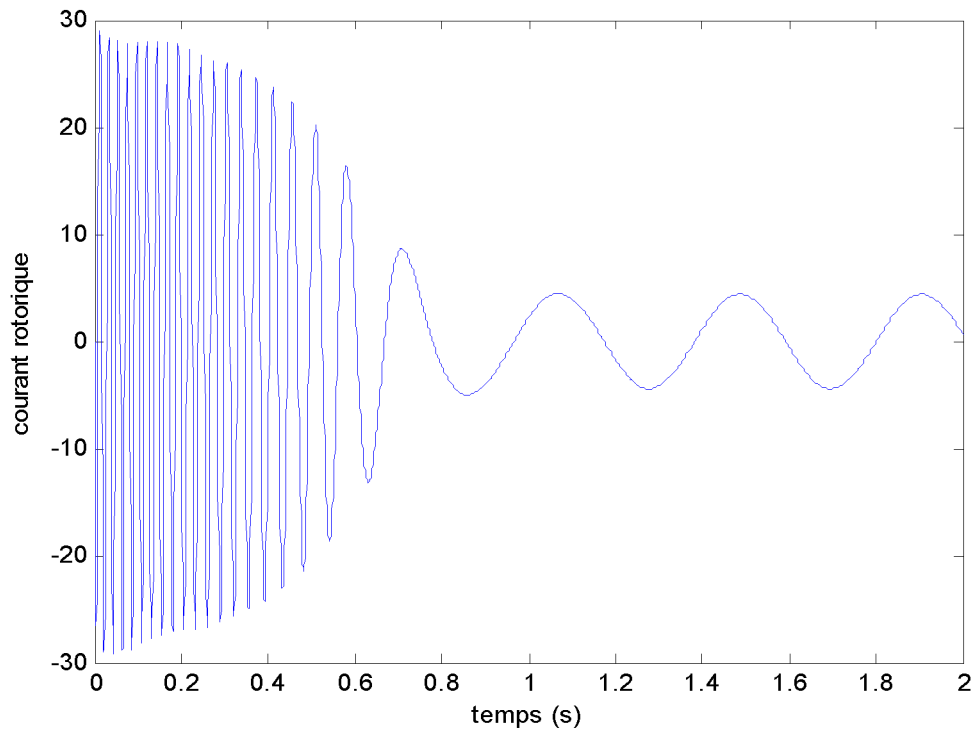
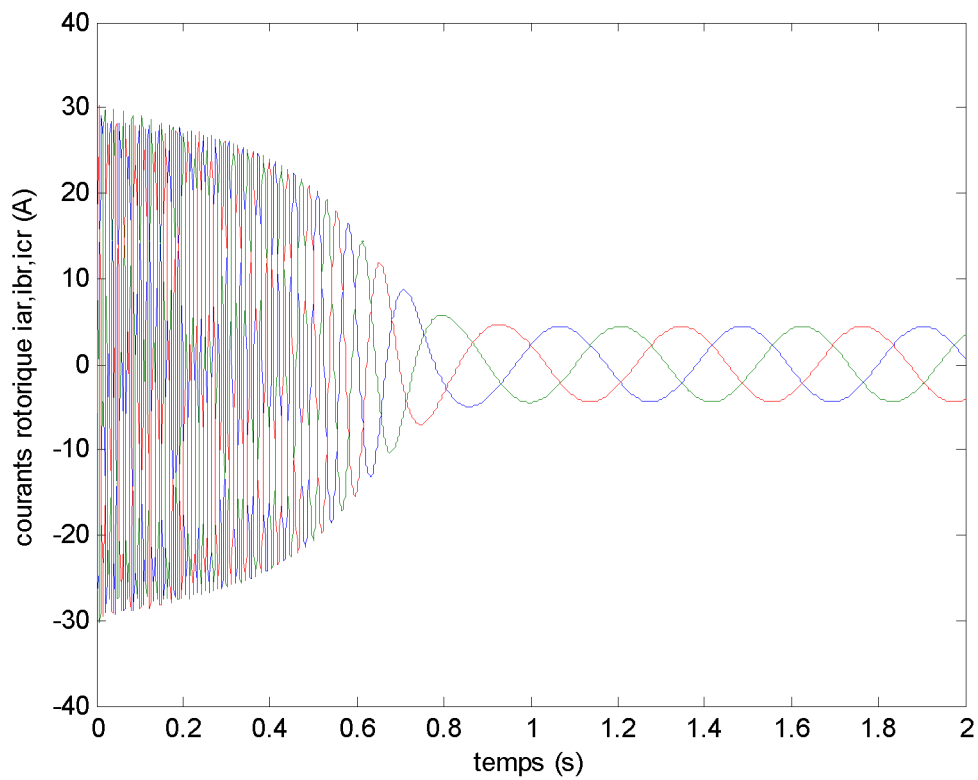
Figure III.21: courant statorique



**Figure III.22:** les deux flux rotorique  $\phi_{dr}, \phi_{qr}$



**Figure III.23:** le couple électromagnétique

**Figure III.24: le courant statorique****Figure III.25: les trois courant rotorique**

### III.8.6 : Interprétation des résultats

Toutes les courbes des différentes grandeurs (courant, flux, vitesse, couple) obtenues par la simulation présente un régime transitoire caractérisé par des fortes pulsations pour toutes les grandeurs, et un régime permanent qui nous donne une valeur plus ou moins stable de ces dernières.

En observant les courbes, on reconnaît l'appel fort du courant au démarrage (régime transitoire) qui est égal à 5 fois environ le courant nominal.

Les machines ont été étudiées à vide et en charge, à vide on constate que la vitesse reste constante, contrairement au courant qui présente des oscillations autour la valeur nominale. Les valeurs moyennes de couple et de courant sont nulles.

Au moment où on applique une charge 5 (N.m) à ( $t = 1s$ ), on observe des changements. La vitesse chute brusquement et se fixe à une certaine valeur, par contre le couple électromagnétique augmente rapidement pour compenser le couple résistant, puis se stabilise. Le courant augmente aussi.

À l'application d'une charge de 5 (N.m) à ( $t = 0s$ ), on observe une chute de vitesse importante et continue.

Les constantes de temps des machines dépendent proportionnellement de la puissance.

### III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation du moteur asynchrone alimenté par une source de tension sinusoïdal triphasée et équilibrée à fréquence constante établi sous d'hypothèses simplificatrices. Après, nous avons utilisé la transformation du Park pour éviter la complexité des équations différentielles. Cette transformation permet le changement du système triphasé réel au système biphasé linéaire équivalent de cette machine ce qui signifie une facilité de résolution et de simulation.

À partir des résultats obtenues on remarque la nécessité d'introduire une commande à notre machine pour compenser les chute de vitesse provoqué par les charge.



**Chapitre IV**

**Commande vectorielle indirect de  
la PCI**

### IV.1.Introduction

Le but de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation), et celle liée au couple (le courant induit). Ce découplage permet d'obtenir une réponse très rapide du couple.

### IV.2.Historique

Les premiers développements théoriques de la méthode du flux orienté ont été réalisés au début des années 70 par *F.Blaschke* et ses applications effectives ont vu le jour grâce à *Leonhard* dix ans plus tard. Les publications de *Leonhard (1983)* montrent que l'implantation de la *CV* offre à la *MAS* alimentée en courant et en tension des performances comparables à celles de la machine à courant continu. Dernièrement, de nombreux développements et raffinements ont été introduits, grâce en grande partie, aux moyens matériels et logiciels permettant la connaissance parfaite de la position instantanée du flux du rotor. [10]

### IV. 3.Objectif De La Commande Vectorielle

La commande vectorielle de la machine asynchrone a pour objectif d'égaliser les performances qu'offre la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. En effet dans cette dernière le découplage entre le flux et le couple est naturellement réalisé.

Ainsi, pour arriver à des situations de commande similaire à celles de la machine à courant continu, il faut, par un système de commande extérieur à la *MAS*, réaliser un découplage du flux et de couple, ce évitera l'interférence des transitoires du flux avec ceux du couple. Cela réalise aujourd'hui par la commande vectorielle à flux orienté ou par champ orienté (de l'anglais, *Field Oriented Control* ou *FOC*). [10]

### IV.4.Définition

La commande vectorielle est un terme générique désignant l'ensemble des commandes tenant compte en temps réel des équations du système qu'elle commande. Le nom de ces commandes vient du fait que les relations finales sont vectorielles à la différence des commandes scalaires. Les relations ainsi obtenues sont bien plus complexes que celles des commandes scalaires, mais en

contrepartie elles permettent d'obtenir de meilleures performances lors des régimes transitoires. Il existe des commandes vectorielles pour tous les moteurs à courant alternatif.

**IV.5. Les classes de la commande vectorielle**

Il existe quatre classes de la commande vectorielle comme les montre l'organigramme suivant

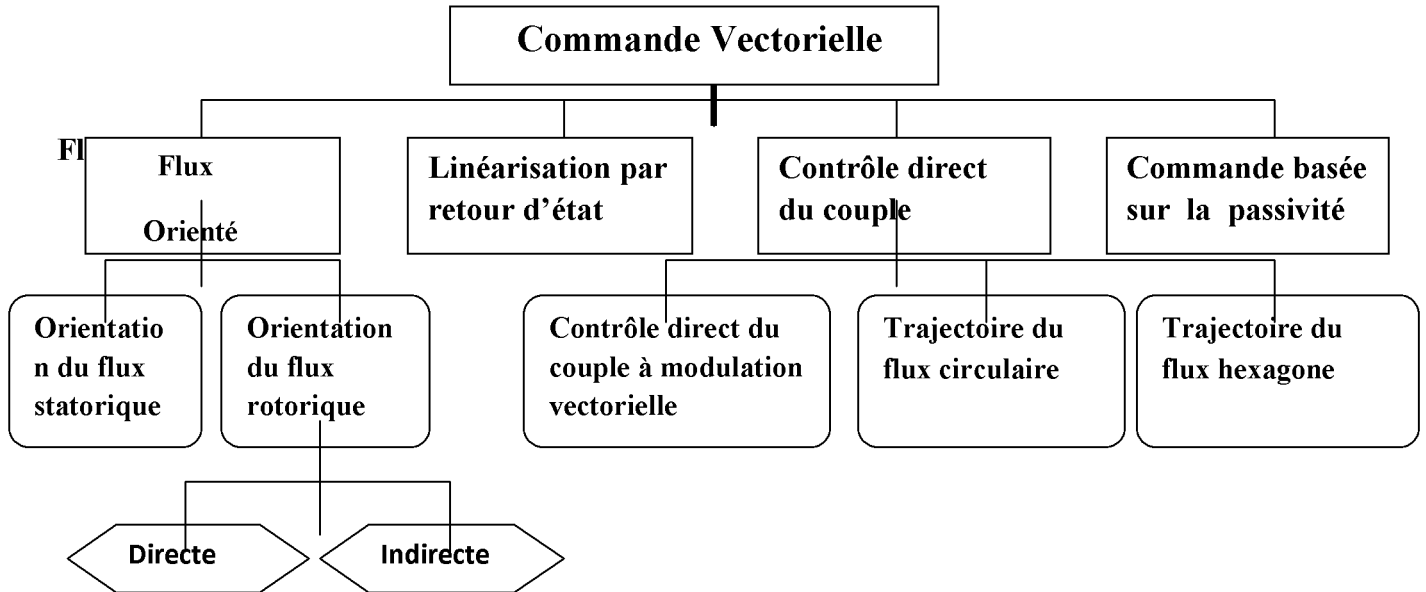


Figure IV.1: Organigramme des différentes classes de la commande vectorielle

**IV.6. La Comparaison Entre La Commande Vectorielle Et La Commande Scalaire**

Commande scalaire	Commande vectorielle
Basée sur le modèle régime permanent	Basée sur le modèle transitoire
Simple à implanter	Précise et rapide
Dynamique lente	Contrôle de couple à l'arrêt
Contrôle des grandeurs en amplitude	Contrôle des grandeurs en amplitude et en phase

**IV.7. Intérêt De La Commande Vectorielle**

- ✓ Permet de réaliser une commande en vitesse de la machine.

- ✓ L'asservissement se fait sur des grandeurs fixes dans le temps.
- ✓ Le réglage du flux et celui du couple sont distincts.
- ✓ Une machine asynchrone pilotée en commande vectorielle est techniquement supérieure en tous points à une MCC de même puissance (couple de démarrage, précision, ...)

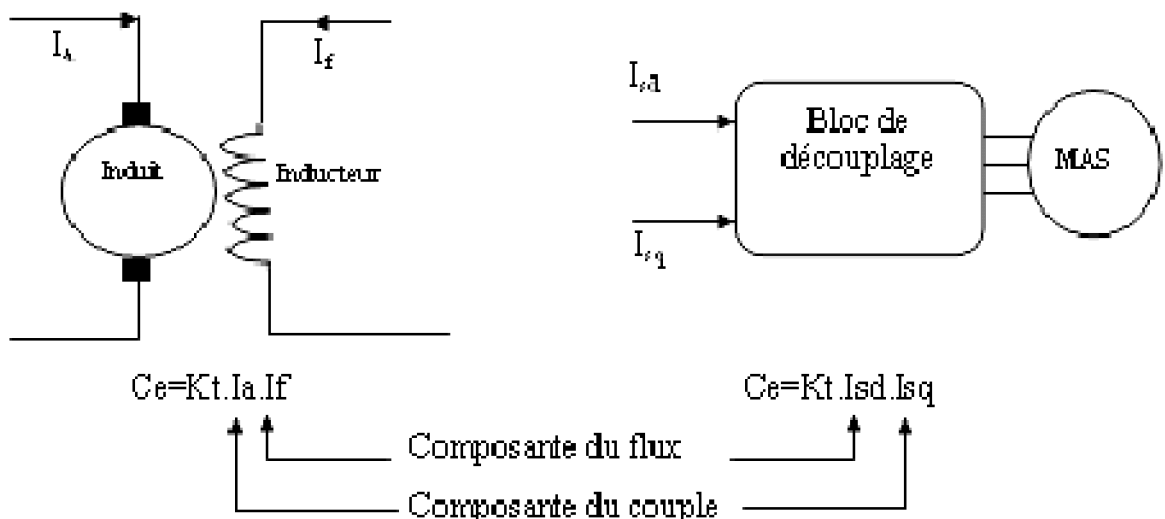
**IV.8. Inconvénient De La Commande Vectorielle**

- Coûte chère (Nécessité d'avoir un contrôleur de type DSP pour réaliser les transformations de Park)

**IV.9. Principe De La Commande Vectorielle**

**IV.9.1. Principe du découplage**

Dans une machine à courant continu, le rotor est bobiné de telle manière, que l'axe de la force magnétomotrice de l'induit établit un angle de 90° avec l'axe du flux inducteur, et ceci quelle que soit la vitesse de rotation de la machine. De ce fait, le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et de courant d'induit. Par contre, dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec le temps, ce qui donne des interactions complexes. Pour obtenir une situation équivalente à celle d'une machine à courant continu, on cherche un repère propre pour que le vecteur courant du stator se décompose en deux composantes, une qui produit le flux et l'autre le couple, comme le montre la figure suivante :



**Figure IV.2 :** Principe du découplage pour la MAS par l'analogie de la MCC

### IV.9.2.Principe de la commande par orientation du flux

#### IV.9.2.a) description

L'examen de l'expression du couple de la machine asynchrone montre qu'elle résulte d'une différence de produits de deux composantes de repère  $(d, q)$  de flux rotorique et le courant statorique. Elle présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine, et fait apparaître la machine asynchrone comme l'association de deux machines à courant continu. Cependant on remarque la complexité d'un contrôle du couple. La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant statorique et le couple par l'autre composante de ce même courant. [8]

#### IV.9.2.b) principe de la commande

Le principe de la commande vectorielle c'est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu, à excitation indépendante, où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux et celle commandant le courant. Reprenons l'expression du couple électromagnétique en fonction du courant statorique et le flux rotorique:

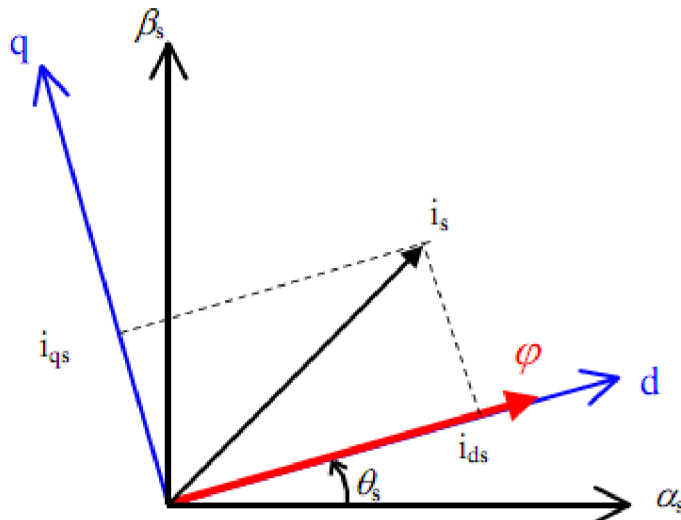
$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{rd} i_{sq} - \phi_{rq} i_{sd})$$

On s'aperçoit que si l'on élimine le deuxième produit  $(\phi_{rq} i_{sd})$ , alors le couple ressemblerait fort à celui d'une Machine à courant continu. Il suffit, pour ce faire, d'orienter le repère dq de manière à annuler la composante de flux en quadrature  $(\phi_{rq})$ . C'est-à-dire, de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct  $(d)$  et donc d'avoir

$$\phi_{qr} = 0 \quad \text{Ainsi} \quad \phi_r = \phi_{rd} \quad (\text{Figure IV.3})$$

Le couple s'écrit alors :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} \cdot \phi_{rd} \cdot i_{qs}$$



**Figure (IV.3)** Orientation du flux rotorique sur l'axe (dq)

D'après les propriétés de l'orientation du flux rotorique, on peut écrire :

$$\varphi_{qr} = 0 \quad (\text{IV.1})$$

$$\varphi_r = \varphi_{dr}$$

Les équations de la machine dans un référentiel lié au champ tournant deviennent :

Pour le stator :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\varphi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{qs} \quad (\text{IV.2})$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \frac{d\varphi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s i_{ds}$$

Pour le rotor :

(IV.3)

$$T_r \frac{d\varphi_r}{dt} + \varphi_r = L_m i_{ds}$$

La vitesse rotorique :

$$\omega_r = \frac{L_m}{T_r \phi_r} i_{qs} \quad (\text{IV.4})$$

Le couple électromagnétique se réduira à :

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r} \phi_{rd} i_{qs} \quad (\text{IV.5})$$

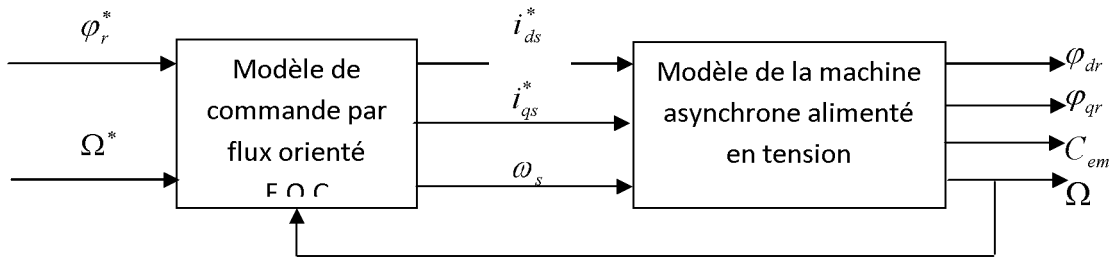
Nous remarquons que seule la composante directe (axe Od) du courant statorique ( $I_{ds}$ ) détermine l'amplitude de flux rotorique ( $\phi_r$ ), alors que le couple ne dépend que de la composante en quadrature (axe Oq) du courant statorique ( $I_{qs}$ ), quant le flux rotorique est maintenu constant. Ainsi, le découplage est réalisé dans ce cas. Ce qui définit l'essentiel de la méthode du flux orienté qui ramène la structure de commande d'une machine asynchrone similaire à celle d'une machine à courant continu, ont utilisent la propriété du découplage « couple-flux ».

Ce modèle est dit modèle réduit de la machine asynchrone commandée en courant, il n'est pas linéaire du fait de la présence d'un terme bilinéaire ( $\phi_{dr} \cdot I_{qs}$ ). Cependant ce terme se trouve dans l'équation du mouvement et étant donné que le flux évolue plus rapidement que la vitesse, nous pouvant remplacer  $\phi_{dr}$  par sa référence (0.9 [Wb]). On aboutit ainsi à un modèle linéaire sur lequel se fera la synthèse de la commande. [7]

Le couple est maximal à tout instant car le courant d'induit  $I_{qs}$  et d'inducteur  $I_{ds}$  sont toujours perpendiculaires et peuvent être commandés indépendamment, on déduit donc que le fonctionnement de la machine asynchrone sera similaire à celui de la machine à courant continu à excitation indépendante

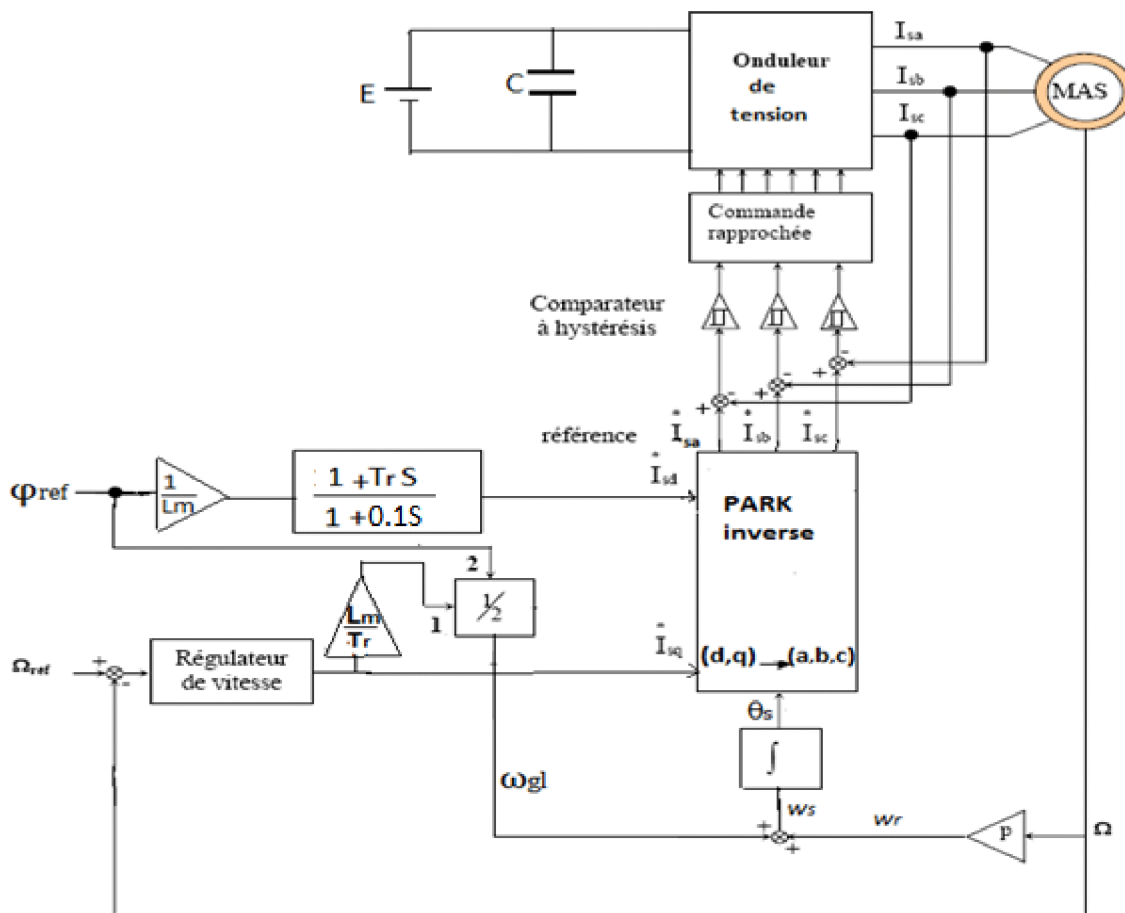
#### IV.9.2.b) Structure d'une alimentation par orientation du flux :

La machine asynchrone présente une structure non linéaire et fortement couplée. Elle peut être découplée en alimentant celle-ci par une source de tension commandée par le bloc à flux orienté. Cette structure de commande est obtenue par inversion de l'un des modèles de la machine par orientation du flux. Afin de montrer qu'effectivement la commande par orientation du flux rotorique permet d'avoir un découplage des grandeurs réelles de la machine asynchrone alimentée en tension (couple et flux), nous proposons le schéma de commande représenté à la figure (3.3).



**Figure (IV.4)** : Schéma de la structure d'une commande par flux orienté (FOC) de la MAS  
Commandé en courant

Le principe de cette commande est donné par le schéma ci-dessous :



**Figure (IV.5)** : Le schéma de principe de la commande vectorielle indirecte d'une MAS  
Alimentée par un onduleur de tension contrôlé en courant.

Les différentes parties constituant ce schéma sont :

- La boucle de la régulation de vitesse.
- Le bloc d'autopilotage pour le calcul de  $\theta_s$ .
- Les transformations directes et inverses.
- Les comparateurs à hystérésis pour réguler les courants.

La vitesse est régulée à travers un régulateur PI (ou un régulateur IP) . La sortie de son régulateur est le courant de référence  $i_{qs}^*$  .

Le courant  $i_{ds}^*$  est calculé à partir du flux à imposé. Ce flux correspond à sa valeur nominale pour la zone de vitesse inférieure à la vitesse de base. Au-delà de cette zone, on procède au « dé fluxage » de la machine de manière à pouvoir atteindre des vitesses supérieures. Le couple maximale que l'on peut imposer devient alors plus faible. Le procédé de dé fluxage en grande vitesse est utilisé en particulier en traction électrique ou l'on a besoin d'un fort couple pendant la phase de démarrage et d'un couple plus faible (qui ne sert à lutter que contre les frottements) pendant la marche normale.

Le filtre passe bas  $(\frac{1}{0.1s + 1})$  permet de rendre les blocs physiquement réalisables (le degré de numérateur d'une fonction de transfert doit être inférieur ou égale à celui du dénominateur).

Après transformation inverse de PARK des courants de référence  $i_{ds}^*$  ,  $i_{qs}^*$  , nous obtenons les courants  $i_{as}^*$  ,  $i_{bs}^*$  et  $i_{cs}^*$  , Ces derniers sont comparés avec les valeurs des courants réels issue de la mesure. L'erreur sera injectée à l'entrée des comparateurs à hystérésis, la sortie des comparateurs est reliée a la logique de commande de l'onduleur de manier à imposer une commutation des interrupteurs lorsque le courant tant de sortir de la bonde imposé.

En parallèle, l'angle  $\theta_s$  sera calculé par l'intégration de la pulsation statorique  $w_s$  à partir d'une mesure de vitesse mécanique  $\Omega$  et du calcul de la pulsation du glissement  $w_{gl}$ ; C'est cet angle qui sera utilisé dans les transformations directes et inverses calculé à partir de la formule suivante :

$$\theta_s = \int w_{gl} dt + \theta_r$$

En analysant ce schéma de commande et les équations associées, on voit apparaître principalement deux paramètres :  $L_m$  et  $T_r$ , ils lient le flux rotorique et le courant  $i_{ds}$  qui le contrôle, mais ils apparaissent surtout dans la formule qui permet de calculer  $\theta_s$  .

**IV.9.2. commande, à l'aide des régulateurs PI :**

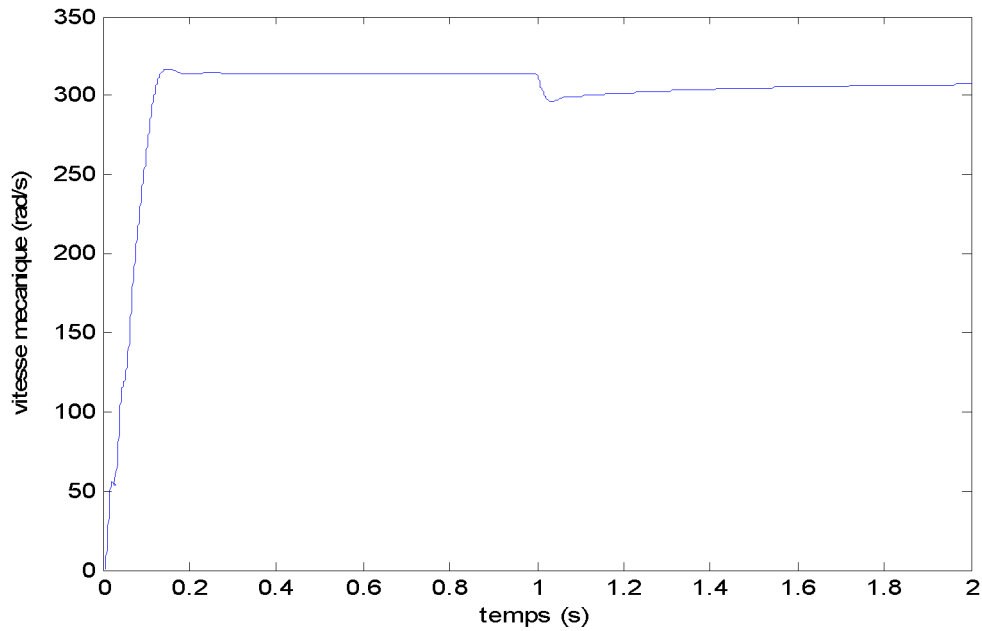
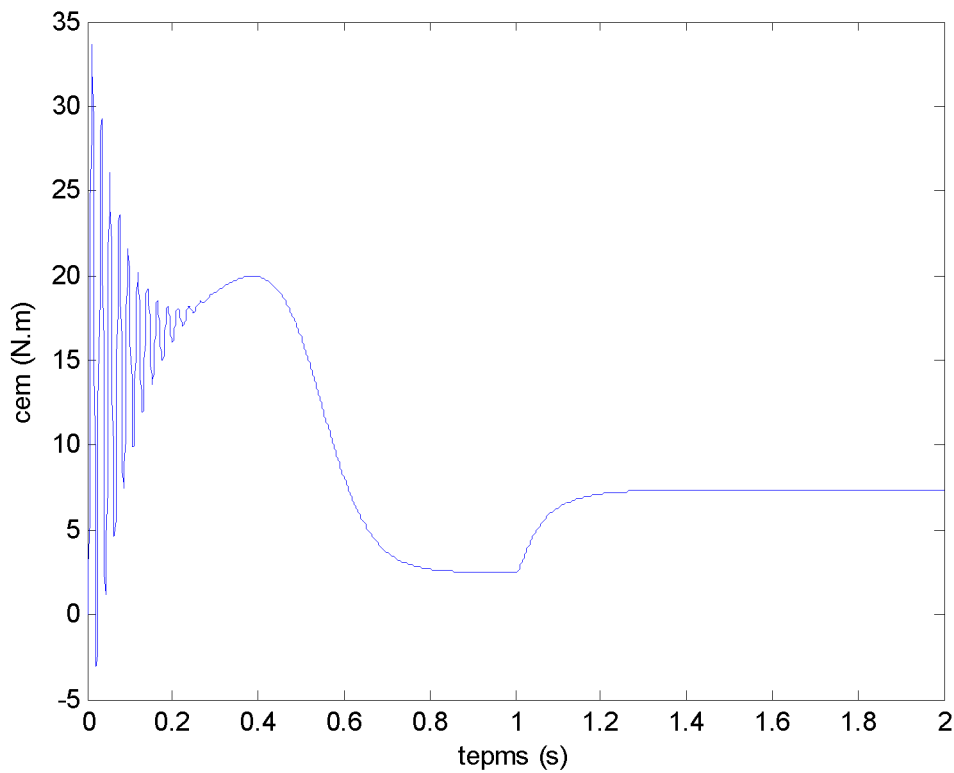
Les régulateurs classiques PI sont dimensionnés (voire annexe B), on a adopté la méthode de la compensation de pole. Alors chaque boucle de régulation est mise sous forme d'un système de premier ordre, les paramètres de régulateur de vitesse  $K_{p\omega}$  et  $K_{i\omega}$  sont données par les relations suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} K_{i\omega} = \frac{1}{G_{0\omega} \cdot \tau_{\omega bf}} \\ K_{p\omega} = \frac{\tau_{\omega}}{G_{0\omega} \cdot \tau_{\omega bf}} \end{array} \right. \quad (\text{IV.6})$$

Dans ce cas, à partir de l'équation (II.53) la fonction de transfert qui décrit la dynamique de la vitesse est donnée par :

$$G_{\omega}(s) = \frac{\omega(s)}{i_{qs}^*(s)} = \frac{p^2 \frac{L_m}{L_r} \frac{\varphi_r}{K_f}}{1 + \frac{J}{K_f} s} \quad \text{avec :} \quad \left\{ \begin{array}{l} G_{0\omega} = p^2 \frac{L_m}{L_r} \frac{\varphi_r}{K_f} \\ \tau_{\omega} = \frac{J}{K_f} \end{array} \right. \quad (\text{IV.7})$$

## IV.11. Résultat de simulation sur Matlab simulink

Pour  $C_r=5$  (N.m) à l'instant ( $t = 1$ s)Figure IV.6: la vitesse de rotation  $W_r$ .Figure IV.7: Couple électromagnétique  $C_{em}$ .

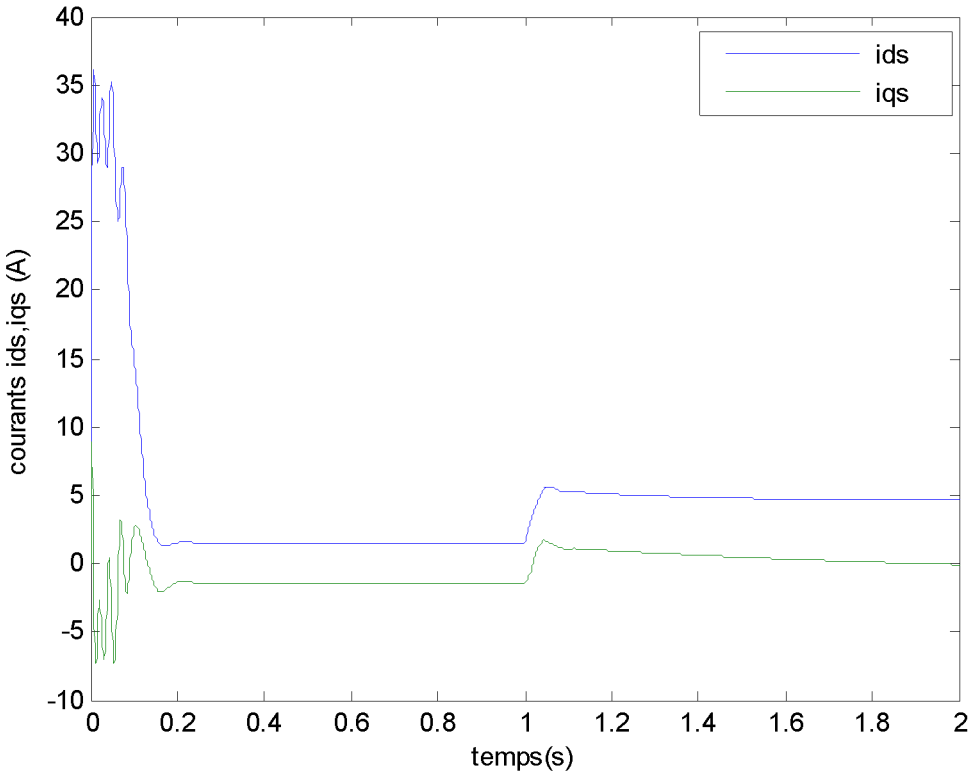


Figure IV.8:les courants iqs et ids.

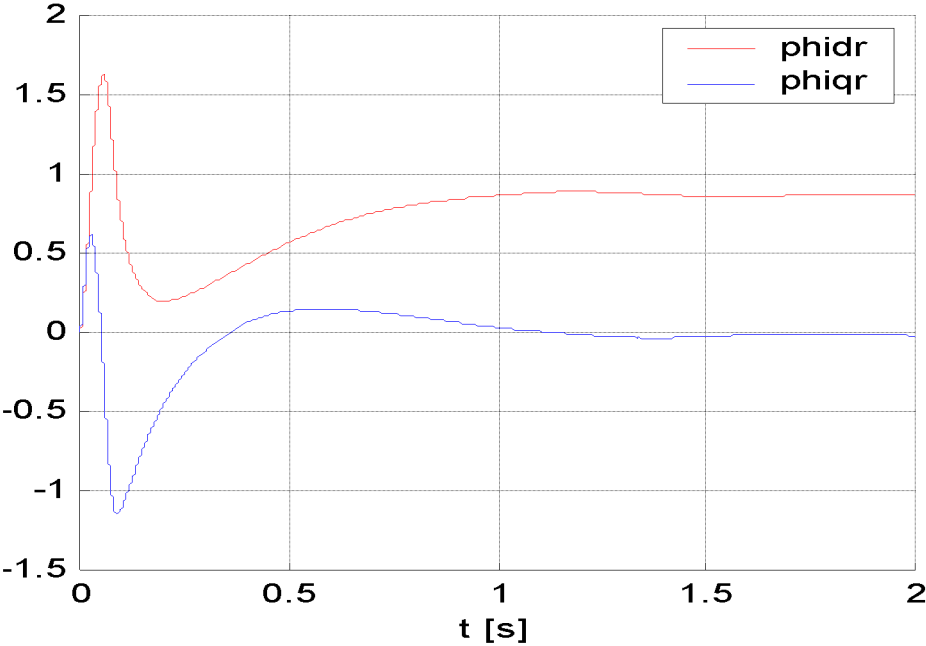
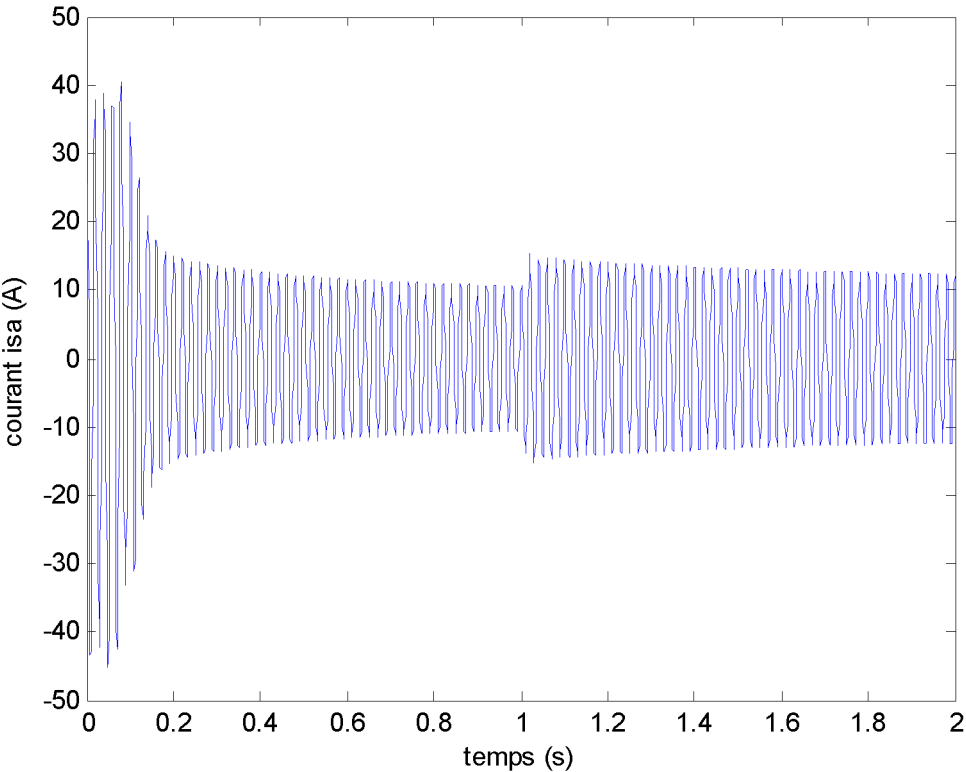


Figure IV.9 : les flux phiqr et phidr.



**Figure IV.10:**Le courant statorique  $i_{sa}$  .

## IV.12. Résultat de simulation sur Matlab simulink

Pour un démarrage en charge d'une PCI :

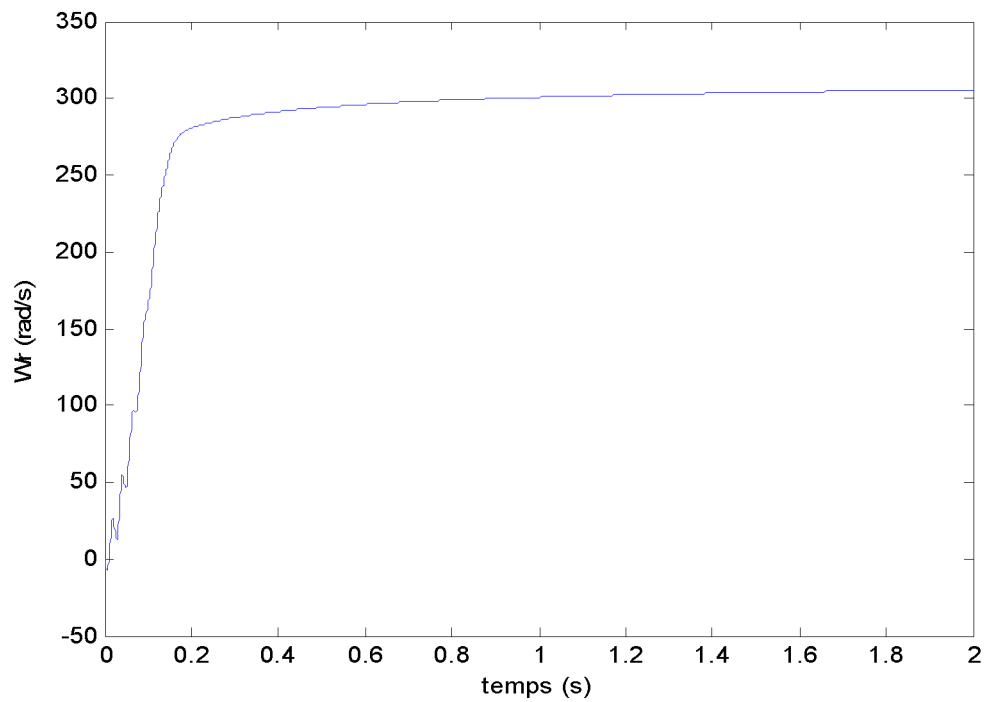


Figure IV.11: la vitesse de rotation  $W_r$ .

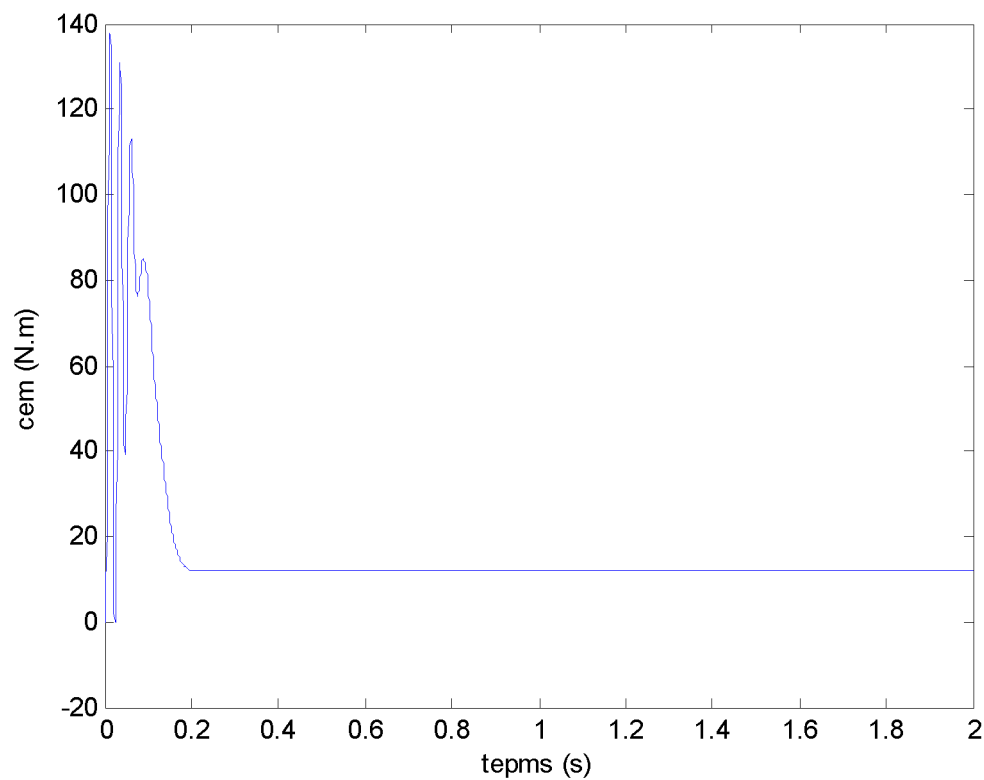


Figure IV.12: Couple électromagnétique Cem

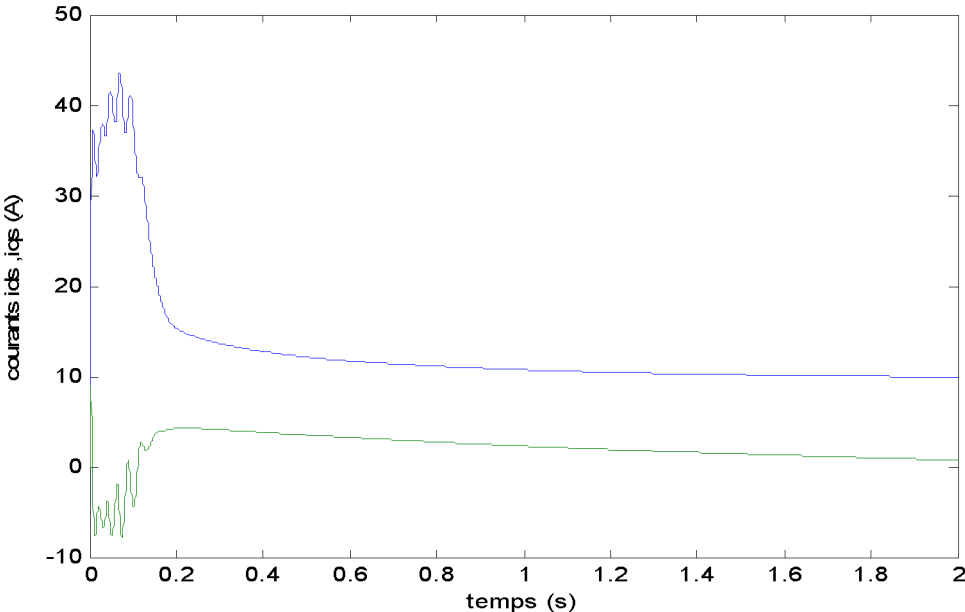


Figure IV.13: les courants iqs et ids

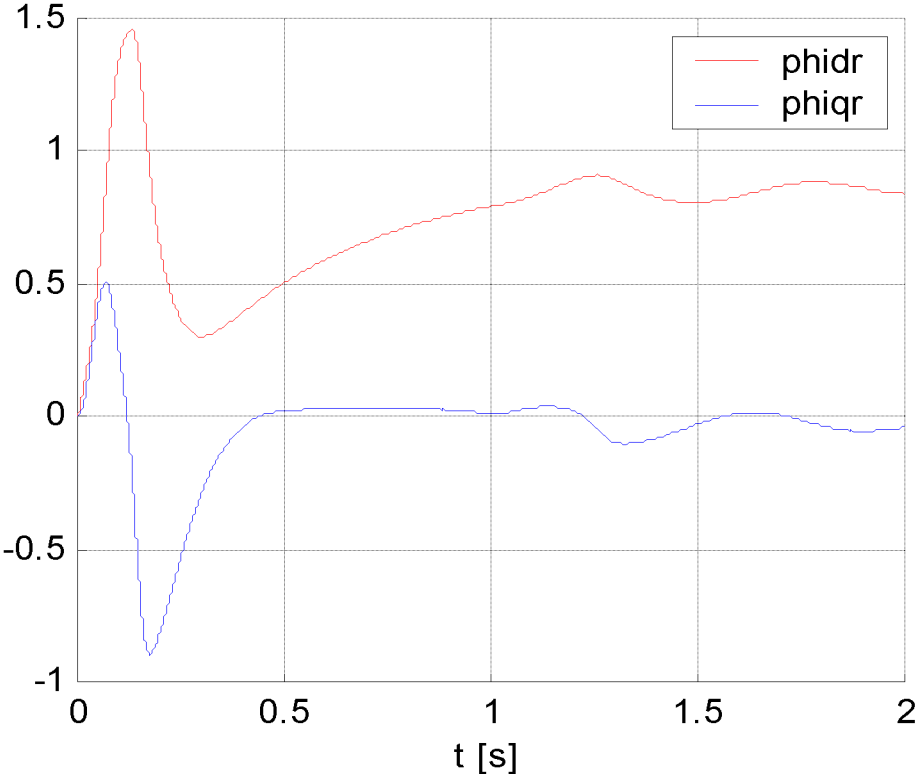


Figure IV.14 : les flux phiqr et phidr.

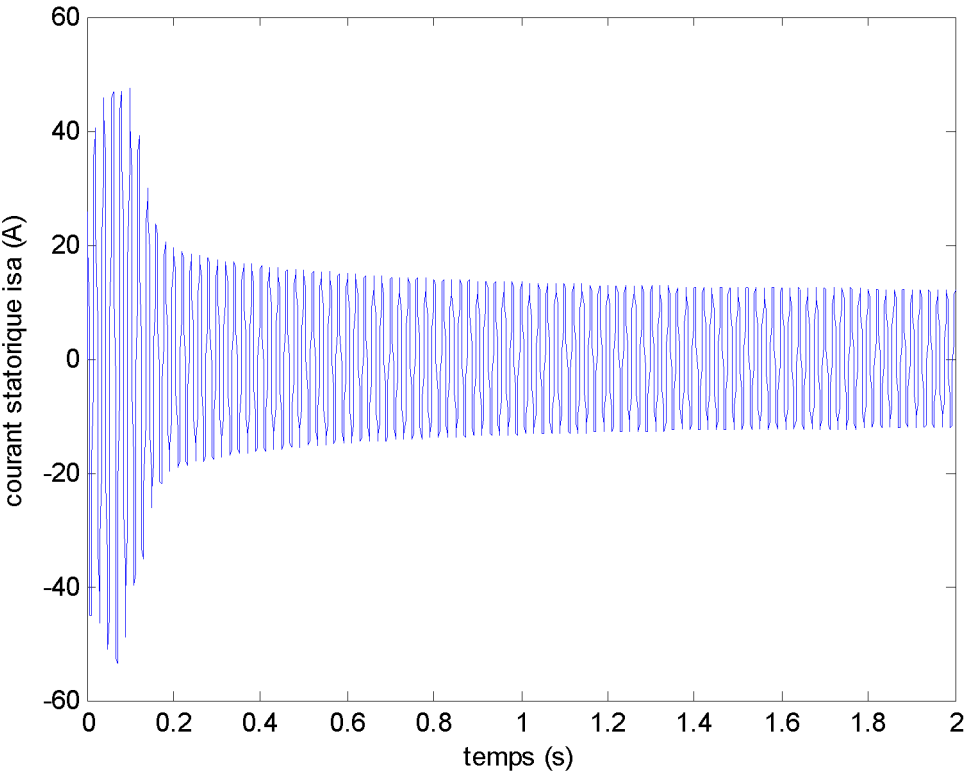


Figure IV.15:Le courant statorique isa.

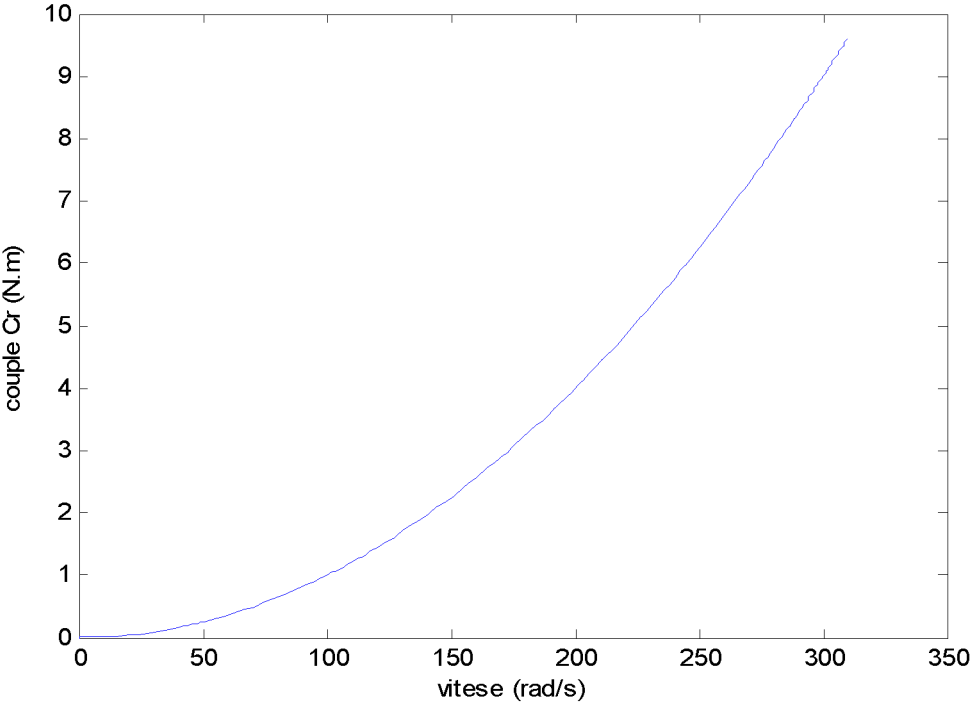


Figure IV.16:Le couple  $C_r$  en fonction de la vitesse  $w$ .

**IV.13.interprétation des résultats**

A partir des résultats obtenus on remarque la compensation des chutes de la tension en introduisant la régulation.

Suivant le principe de la commande vectoriel le comportement des flux est logique ou on un flux phiqr qui s'annule et un flux rotorique phiqr qui stabilise a 0.9 (w).

**IV.14.conclusion**

Le contrôle vectoriel est introduit afin de pouvoir commander la machine asynchrone avec le maximum de dynamique, il repose sur un modèle en régime transitoire, pour cela on a utilisé le types des régulateurs classique : PI.

Les résultats obtenus dans ce chapitre montrent clairement que l'on peut réaliser le découplage entre le flux et le couple en utilisant la technique de la commande vectorielle par Flux orienté.

La synthèse des correcteurs est plus simple puisque on obtient un modèle linéaire grâce au découplage du système.

L'étude effectuée montre que le flux intervient dans l'orientation du référentiel de Park, dans le procédé de découplage et dans le contrôle du couple électromagnétique.

Le flux doit donc être évalué en utilisant des capteurs ce qui est couteux et assez compliqué, ou reconstruit au travers d'estimateurs ou observateurs et cela à partir des mesures disponibles.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

---

L'objectif essentiel de notre travail est de réaliser une commande vectorielle à flux rotorique orienté pour une machine asynchrone à cage d'écureuil destinée à l'entraînement d'une pompe centrifuge immergée.

Afin d'aboutir à cet objectif, nous avons suivi une étude basée essentiellement sur trois parties, la première, représente des généralités sur les machines asynchrones et les pompes centrifuges immergées. La seconde étape c'est la modélisation de cette machine en considérant la structure du système avec une partie primaire (le stator) et une partie secondaire en court-circuit (le rotor). A l'aide de la transformée de Park on passe d'un modèle triphasé vers un système d'axes biphasé (d,q), qui est donné dans le cadre de certaines hypothèses permettant de simplifier la modélisation. Les équations de flux, courants et tensions ont alors été extraites. Grâce au logiciel informatique MATLAB/SIMULINK, nous avons pu simuler la machine à vide et en charge. La dernière tâche de notre travail, concerne la réalisation et la simulation des modèles mathématiques de la commande vectorielle à flux rotorique orienté.

Les résultats de cette étude montrent clairement que l'on peut réaliser le découplage entre le flux et le couple en utilisant la technique de la commande vectorielle par flux orienté.

La synthèse des correcteurs est plus simple puisque on obtient un modèle linéaire grâce au découplage du système

En fin on peut dire que cette étude est une opportunité qui nous a permis de nous intéresser de très près à la modélisation et à la commande vectorielle de la machine asynchrone qui nous semble tout à fait essentielle. Il est vrai, qu'au premier abord, l'étude de cette commande est complexe, étant basée sur l'utilisation des théories et outils mathématiques consistants. Néanmoins, les modèles mathématiques du contrôle vectoriels, sont simples et efficaces et c'est grâce à l'utilisation de Matlab/simulink qui nous a beaucoup aidé.

# **Bibliographie**

## Bibliographie

---

- [1] : <http://www.discip.ac-caen.fr/sti/stibacs/pdf/moteur-asynchrone.pdf>.
- [2] : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine\\_asynchrone](http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone).
- [3] : [http://mariepierrot.free.fr/lycee/mai2doc/moteur\\_asynchrone\\_iut.pdf](http://mariepierrot.free.fr/lycee/mai2doc/moteur_asynchrone_iut.pdf)
- [4] : Willdi. Electrotechnique 3<sup>ème</sup> édition, 1999.
- [5] : <http://electrotechnique1.blogspot.com/p/la-machine-asynchrone.html>
- [6] : mémoire présenté par D-Fateh et Z-Lyess, Synthèse des différents modes de Démarrage d'un moteur asynchrone.
- [7] : Documentation interne de Sonatrack  
Catalogue sur les pompes centrifuges immergées, les moteurs d'entraînement et leurs variateurs de vitesse.
- [8] : L.BAGHLI  
Commande électronique de la machine électrique 2004 Edition DUNOD.
- [9] : J-P.CARON, J-P.HAUTIER  
Modélisation et commande des machines asynchrones  
Edition technip 1995
- [10] D. Reyed D. et Diallo D., "La Commande Vectorielle du Moteur Asynchrone," Journées SEE., Lille, France, 1992.