



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Amar Telidji – Laghouat



**DOMAINE : Sciences et techniques**

**FILIERE : Electrotechnique**

**OPTION : Electrotechnique Industrielle**

**FACULTE : Technologie**

**DEPARTEMENT : Electrotechnique**

**MEMOIRE DE MASTER**

Présenté par : TAYEBI Maamar

SAIDAT Riad

**Thème :**

**Etude généralisée d'une machine asynchrone triphasée  
en vue d'une construction d'un diagramme circulaire complet**

*Jury de soutenance :*

HADJADJ Abdechafik

Professeur

Président

BESSEDIK Sid Ahmed

MCA

Examineur

BOUFLIGHA Messaoud

MCA

Encadreur

*Promotion : 2023 - 2024*

## Dédicaces

Nous dédions ce modeste travail  
(( Mémoire de Fin Etude pour obtention  
Diplôme de Master en ((E.L.T.I.))...))  
À Nos Familles soit de loin ou de proche.

À Tous nos amis

À tous les profs

À notre encadreur

Bien amicalement

*T.Maamar S.Riad*

## Remerciements

A notre très cher, Dieu Tout-Puissant qui nous a permis d'accomplir cet humble travail.

Nous adressons ensuite nos sincères remerciements à notre honorable superviseur, **M. BOUFLIGHA Messaoud**, pour ses précieux conseils tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous n'oublions pas non plus de remercier les membres du jury qui nous ont honorés de leur présence. Nous tenons à les remercier pour l'importance qu'ils ont attachée à notre travail et pour les précieux conseils et commentaires prodigués.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos familles pour le soutien et les précieux conseils qu'elles nous ont apportés ainsi que pour tous les moyens possibles qu'elles nous ont donnés pour achever nos études et atteindre cette étape finale.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ces travaux et à sa réussite.

Merci à tous.

## دراسة عامة للآلة غير المتزامنة ثلاثية الطور بهدف بناء مخطط دائري كامل

### ملخص:

هذا العمل عبارة عن دراسة عامة للآلة غير المتزامنة ثلاثية الطور الهدف منه هو بناء مخطط الدائرة الكامل. ولهذا من الضروري إجراء اختبارين وهما اختبار عدم التحميل واختبار الدوار المقفل. هذان الاختباران يتيحان أيضا تقدير قيم عناصر النموذج المكافئ للآلة. كما تم استخدام مخطط الدائرة المنشأ لتحديد الخصائص عند نقطة التشغيل الاسمية. وبالمثل تم تطوير برنامج ماتلاب الذي يسمح بمحاكاة بعض خصائص الآلة غير المتزامنة ولا سيما الخصائص الميكانيكية التي تعمم التشغيل المحرك والمولد.

**كلمات مفتاحية:** الآلة غير المتزامنة ; مخطط الدائرة؛ النموذج المكافئ؛

### **A generalized study of a three-phase asynchronous machine with a view to constructing a complete circular diagram**

#### **Abstract:**

this work is a generalized study of the three-phase asynchronous machine. The objective is the construction of a complete circle diagram. Two tests namely the no-load test and the blocked rotor test are necessary .this tests make it possible to determine the parameters of the equivalent circuit. The constructed circle diagram was used to determine the operating characteristics at the nominal point. Similarly a Matlab program was developed which allows some characteristics of the asynchronous machine to be simulated in particular the mechanical one generalizing the motor and the generator operation.

**Keywords :** Asynchronous machine, Circle diagram, equivalent circuit,

### **Etude généralisée d'une machine asynchrone triphasée en vue d'une construction d'un diagramme circulaire complet**

#### **Résumé :**

Ce travail est une étude généralisée de la machine asynchrone triphasée. L'objectif est la construction de diagramme de cercle complet. Deux essais à savoir l'essai à vide et l'essai à rotor bloqué sont inévitables. Ils permettent aussi de déterminer les paramètres du schéma équivalent de la machine. Le diagramme du cercle construit a été exploité pour déterminer les caractéristiques au point nominal. De même un programme Matlab a été élaboré. Il permet de simuler quelques caractéristique de la machine asynchrone en particulier la caractéristique mécanique généralisant le fonctionnement moteur et génératrice.

**Mots clés :** Machine asynchrone ; Diagramme du cercle, schéma équivalent

## Table des matières

Résumé.	I
Sommaire Générale.	II
Liste des figures.	V
Liste des tableaux.	VII
Liste des abréviations et des symboles.	VIII
Introduction générale.	1

### Sommaire Générale :

#### Chapitre I: Généralités sur la machine asynchrone triphasé.

I.1 Introduction.	6
I.2 Description générale de la machine asynchrone.	6
I.2.1 Constitution.	6
I.2.1.1 Stator (inducteur).	7
I.2.1.2 Rotor (induit).	7
I.2.1.2.1 Rotor à cage d'écurueil.	7
I.2.1.2.2 Rotor bobiné.	8
I.2.2 Principe de fonctionnement.	8
I.2.3 Etude du couple.	9
I.2.3.1 Etude de la courbe du couple en fonction de glissement.	9
I.2.4. Modes de fonctionnement de la machine asynchrone.	10
I.2.4.1 Stabilité lors de fonctionnement en mode moteur.	13
I.2.4.2 Stabilité lors de fonctionnement en mode frein.	14
I.2.4.3 Stabilité lors de fonctionnement en mode génératrice.	14
I.3 Conclusion.	15

#### Chapitre II : Schéma équivalent de la machine asynchrone .

II .1 Introduction.	18
II .2 Fonctionnement à Rotor ouvert.	18
II .3 Fonctionnement en rotation.	19

II .4 Détermination des paramètres électriques du schéma équivalent.	22
II .4.1 Paramètres typiques du moteur à rotor bobiné choisi.	22
II .4.2 Résultats d'essais nécessaires.	22
II .4.2.1 Résultats de l'essai à vide.	22
II .4.2.2 Résultats de l'essai à rotor bloqué.	23
II .4.2.3 Mesure des résistances des enroulements statorique $R_1$ et rotorique $R_2$	23
II .5 Bilan de puissance dans le cas des trois modes de fonctionnement.	26
II .6 Conclusion.	26

### **Chapitre III : construction et exploitation de diagramme circulaire complet.**

III .1 Introduction.	29
III .2 Formes de l'équation du cercle.	29
III .2.1 Forme rayon-centre.	29
III .2.2 Forme développé.	29
III .3 Hypothèse de Kapp et équation du cercle.	30
III .4 construction de diagramme de cercle.	31
III .4.1 Calculs préliminaires.	31
III .4.2 Procédure de construction.	32
III .4.3 Exploitation du diagramme de cercle.	35
III .5 construction de diagramme circulaire en utilisant un programme Matlab.	38
III .6 Relevé des caractéristiques en fonctionnement moteur.	40
III .7 Conclusion.	46

Conclusion générale.	49
Bibliographie.	
Annexes.	

## Liste des figures :

### Liste des figures de chapitre I :

<b>Fig.I.1</b> : Vue éclatée d'un moteur asynchrone triphasé.	6
<b>Fig.I.2</b> : le stator.	7
<b>Fig.I.3</b> : structure de cage d'écureuil.	7
<b>Fig.I.4</b> : Enroulements d'un rotor bobiné.	8
<b>Fig.I.5</b> : Variation du couple en fonction de glissement pendant le fonctionnement de la machine asynchrone en mode moteur et en génératrice.	9
<b>Fig.I.6</b> : Localisation des zones de stabilité et d'instabilité lors du fonctionnement en moteur.	10
<b>Fig.I.7</b> : illustration simplifiée d'un système de levage par un moteur à rotor bobiné.	10
<b>Fig.I.8</b> : Sens de rotation de la machine asynchrone par rapport au champ tournant en fonctionnement moteur.	11
<b>Fig.I.9</b> : Sens de rotation de la machine asynchrone par rapport au champ tournant en fonctionnement génératrice.	11
<b>Fig.I.10</b> : Sens de rotation de la machine asynchrone par rapport au champ tournant en fonctionnement frein.	12
<b>Fig.I.11</b> : caractéristique mécanique généralisée de la machine asynchrone.	12
<b>Fig.I.12</b> : Effet de l'insertion de la résistance de démarrage avec la résistance rotorique.	13
<b>Fig.I.13</b> : Courbe descriptive de la stabilité en fonctionnement en mode moteur.	13
<b>Fig.I.14</b> : Courbe descriptive de la stabilité en fonctionnement en mode frein.	14

### Liste des figures de chapitre II :

<b>Fig.II.1</b> : Schéma équivalent du moteur asynchrone à rotor ouvert.	18
<b>Fig.II.2</b> : Schéma équivalent du moteur asynchrone à rotor en court-circuit.	19
<b>Fig.II.3</b> : autre forme du schéma équivalent du moteur asynchrone.	20
<b>Fig.II.4</b> : Schéma équivalent du moteur asynchrone ramené au stator.	20
<b>Fig.II.5</b> : Schéma équivalent du moteur asynchrone ramené au stator avec Décomposition de la puissance électromécanique et des pertes joules rotoriques.	21
<b>Fig.II.6</b> : Schéma équivalent approximatif ramené au stator du moteur asynchrone.	21

<b>Fig.II.7</b> : illustration du schéma de la mesure de la résistance d'un enroulement du stator couplé étoile.	23
<b>Fig.II.8</b> : illustration du schéma de la mesure de la résistance d'un enroulement du rotor couplé en étoile.	24
<b>Fig.II.9</b> : cheminement de la puissance lors de fonctionnement de la machine asynchrone en divers modes.	26

### **Liste des figures de chapitre III :**

<b>Fig.III.1</b> : Cercle centré en C et de rayon R.	29
<b>Fig.III.2</b> : Schéma équivalent simplifié.	30
<b>Fig.III.3</b> : Diagramme vectoriel simplifié.	30
<b>Fig.III.4</b> : Illustration graphique de la détermination du glissement.	34
<b>Fig.III.5</b> : Organigramme du programme Matlab.	37
<b>Fig.III.6</b> : Diagramme de cercle issu des essais à vide et à rotor bloqué du moteur asynchrone	38
<b>Fig.III.7</b> : Partie entière positive de cercle.	38
<b>Fig.III.8</b> : Localisation de point M ( $g = \infty$ ) sur le diagramme de cercle	39
<b>Fig.III.9</b> : Diagramme de cercle complet.	40
<b>Fig.III.10</b> : Variation du courant absorbé en fonction de la puissance utile.	41
<b>Fig.III.11</b> : Variation du courant absorbé en fonction de glissement.	41
<b>Fig.III.12</b> : Variation du facteur de puissance en fonction de la puissance utile.	42
<b>Fig.III.13</b> : Variation du rendement en fonction du courant absorbé.	42
<b>Fig.III.14</b> : Variation de puissance absorbée en fonction de la puissance utile.	43
<b>Fig.III.15</b> : Variation du couple électromagnétique en fonction de la vitesse	43
<b>Fig.III.16</b> : Variation de puissance absorbée en fonction du courant absorbé	44
<b>Fig.III.17</b> : Variation du couple utile en fonction de la puissance utile.	44
<b>Fig.III.18</b> : Caractéristique mécanique généralisant le fonctionnement moteur et génératrice.	45
<b>Fig.III.19</b> : Variation du couple électromagnétique en fonction de glissement.	45

## Liste des tableaux :

### Liste des tableaux de chapitre II :

<b>Tableau.II.1</b> Paramètres du moteur à rotor bobiné choisi.	22
<b>Tableau.II.2</b> Mesures relevées lors d'un essai à vide.	22
<b>Tableau.II.3</b> Mesures relevées lors de l'essai à rotor bloqué.	23
<b>Tableau.II.4</b> Paramètres du schéma équivalent issus des essais à vide et à rotor bloqué.	24
<b>Tableau.II.5</b> Valeurs des résistances à la température de service.	25

### Liste des tableaux de chapitre III :

<b>Tableau.III.1</b> valeur de résultats de l'essai à vide.	31
<b>Tableau.III.2</b> valeur de résultats de l'essai à rotor bloqué.	32

## Liste des abréviations et des symboles :

**UTE** : Union technique des électriciens.

**$n_s$**  : est vitesse de synchronisme.

**$n$**  : Vitesse de rotation.

**$f$**  : est la fréquence d'alimentation.

**$p$**  : est le nombre de paire de pôles.

**$g$**  : Glissement.

**$I_{10}$**  : le courant statorique à rotor ouvert.

**$R_F$**  : résistance fictive représentant les pertes fer.

**$X_\mu$**  : réactance réelle servant à représenter la puissance réactive requise pour produire la magnétisation.

**$R_2$**  : la résistance d'une phase rotorique.

**$X_2$**  : la réactance d'une phase rotorique.

**$R'_2$**  : la résistance ramenée au stator d'un enroulement rotorique.

**$X'_2$**  : la réactance ramenée au stator d'un enroulement rotorique.

**$R_c$**  : une résistance fictive variable qui représente le taux de la conversion d'énergie électromécanique.

**$E_1$**  : Force électromotrice induite statorique du moteur.  
 **$E_2$**  : Force électromotrice induite rotorique du moteur.  
 **$V$**  : Tension simple.  
 **$U$**  : Tension composée entre deux phases.  
 **$\varphi$**  : Déphasage.  
 **$\cos\varphi$**  : facteur de puissance.  
 **$\omega_s$**  : Pulsation des courants statoriques.  
 **$\omega$**  : Pulsation des courants rotoriques.  
 **$P_a$**  : Puissance absorbée.  
 **$P_u$**  : Puissance utile.  
 **$P_0$**  : Puissance à vide.  
 **$P_{cc}$**  : Puissance active en court-circuit.  
 **$Q_{cc}$**  : Puissance réactive en court-circuit.  
 **$C_M$**  : Couple maximal du moteur.  
 **$C_u$**  : Couple utile.  
 **$C_r$**  : Couple résistant.  
 **$C_e$**  : Couple électromagnétique.  
 **$P_J$**  : Pertes Joules.  
 **$P_{js}$**  : Pertes Joules statoriques.  
 **$P_{jr}$**  : Pertes Joules rotoriques.  
 **$P_{fs}$**  : Pertes fer.statorique.  
 **$P_{fr}$**  : Pertes fer rotoriques.  
 **$P_{tr}$**  : Puissance transmise au rotor.  
 **$m$**  : rapport de transformation.  
 **$P_v$**  : pertes de friction et d'aération (pertes mécaniques).

## *Introduction générale*

---

## **Introduction générale :**

La machine asynchrone à nos jours est utilisée dans plusieurs domaines en industrie. Elle est caractérisée par sa robustesse et nécessite un minimum d'entretien contrairement à la machine à courant continu. Cette machine peut fonctionner en moteur, en génératrice et en frein.

La généralisation du fonctionnement de la machine asynchrone permet la marche dans les deux sens de rotation, la récupération de l'énergie et le freinage. Cette généralisation peut trouver son utilisation dans les engins de levages à savoir les montes charges.

Pour assurer cette généralisation avec efficacité il faut que le rotor soit bobiné et conçu pour supporter le mode de fonctionnement en frein. Lorsque on veut employer la machine asynchrone dans une application, il faut connaître certaines caractéristiques en particulier sa caractéristique mécanique comme par exemple en fonctionnement moteur et en génératrice. Cependant lorsque la puissance est très élevée, les relevés expérimentaux des caractéristiques sont difficiles et parfois impossibles.

Il a été démontré que lorsque la machine asynchrone fonctionne à tension et à fréquence constante et si le glissement varie (la charge varie) un cercle détermine le lieu de l'extrémité de ce courant  $I$  absorbé. Ce cercle représente la variation de la composante active en fonction de la composante réactive du ce courant. C'est une représentation graphique qui permet de déterminer toutes les caractéristiques de fonctionnement à n'importe quel régime de fonctionnement.

Cette méthode exige l'obtention des résultats de trois essais (essai à vide, essai à rotor bloqué, et la mesure des résistances à chaud des enroulements statorique et rotorique.). Les avantages de cette méthode et sa simplicité et la rapidité dans l'obtention des caractéristiques de fonctionnement. Il faut signaler qu'il faut seulement apporter une correction de ce cercle pour une puissance inférieure à 15 kw.

Dans le cas de la représentation graphique nous focalisons sur les résultats typiques des essais cités ci-dessus en fonctionnement d'un moteur à rotor bobiné exigeant une puissance utile de 70 kw en marche continue. Nous essayons d'exploiter cette représentation pour dégager certains résultats au point de fonctionnement nominal. De plus et en s'aidant d'un programme Matlab, nous essayons de relever quelques caractéristiques en particuliers les caractéristiques mécaniques en fonctionnement moteur et génératrice.

Dans le but d'achever ces objectifs nous divisons ce mémoire en trois chapitres :

**Au premier chapitre** : nous présentons certaines généralités de la machine asynchrone en particulier le principe et les modes de fonctionnement.

**Au deuxième chapitre** : Nous menons une étude simple sur le schéma équivalent de la machine asynchrone. Nous rappelons les paramètres de moteur choisi. Ensuite nous présentons les résultats des essais permettant de déterminer les paramètres du schéma équivalent. Puis nous évoquons le bilan de puissance en fonctionnement en les trois modes.

**Au troisième chapitre** : On commence par le rappel de l'équation cartésienne théorique d'un cercle. Ensuite en utilisant l'hypothèse de Kapp nous essayons d'établir l'équation du cercle dans le cas du schéma équivalent simplifié.

Nous présentons des calculs préliminaires en se basant sur les résultats issus des différents essais nécessaires pour la construction de diagramme circulaire. Nous montrons la description de la procédure de cette construction.

Nous essayons de déterminer les résultats au point de fonctionnement nominal. Nous élaborons un programme Matlab qui nous permet de simuler quelques caractéristiques en particulier la caractéristique mécanique généralisant le fonctionnement moteur et génératrice. la clôture est une conclusion générale.

*Chapitre I*  
*Généralités sur la machine asynchrone triphasée*

---

## **Sommaire Chapitre I:**

I.1 Introduction.	6
I.2 Description générale de la machine asynchrone.	6
I.2.1 Constitution.	6
I.2.1.1 Stator (inducteur).	7
I.2.1.2 Rotor (induit).	7
I.2.1.2.1 Rotor à cage d'écureuil.	7
I.2.1.2.2 Rotor bobiné.	8
I.2.2 Principe de fonctionnement.	8
I.2.3 Etude du couple.	9
I.2.3.1 Etude de la courbe du couple en fonction de glissement.	9
I.2.4. Modes de fonctionnement de la machine asynchrone.	10
I.2.4.1 Stabilité lors de fonctionnement en mode moteur.	13
I.2.4.2 Stabilité lors de fonctionnement en mode frein.	14
I.2.4.3 Stabilité lors de fonctionnement en mode génératrice.	14
I.3 Conclusion.	15

## I.1. Introduction :

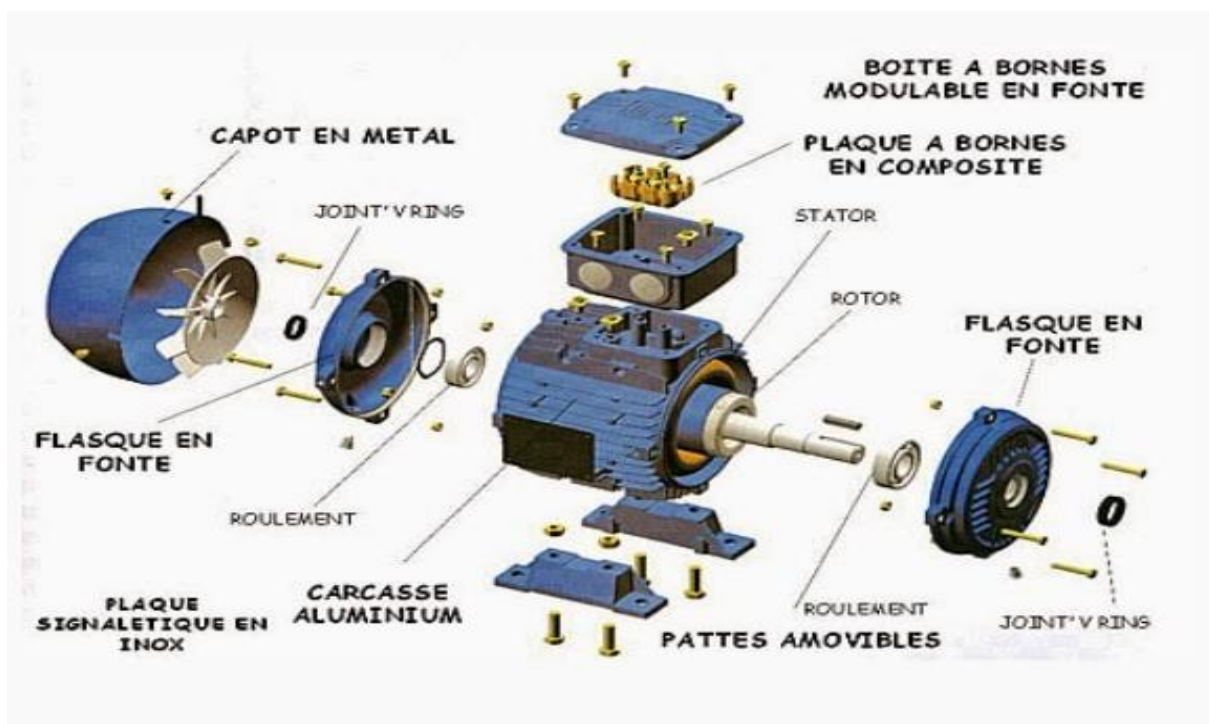
La machine asynchrone est la machine la plus utilisée dans l'industrie. Son principal avantage est sa robustesse et qu'elle ne nécessite qu'un minimum d'entretien contrairement à la machine à courant continu. Dans ce chapitre nous présentons certaines généralités de la machine asynchrone en particulier le principe et les modes de fonctionnement.

## I.2 Description générale de la machine asynchrone :

Nous focalisons dans cette description générale sur la machine asynchrone en fonctionnement moteur [1,3].

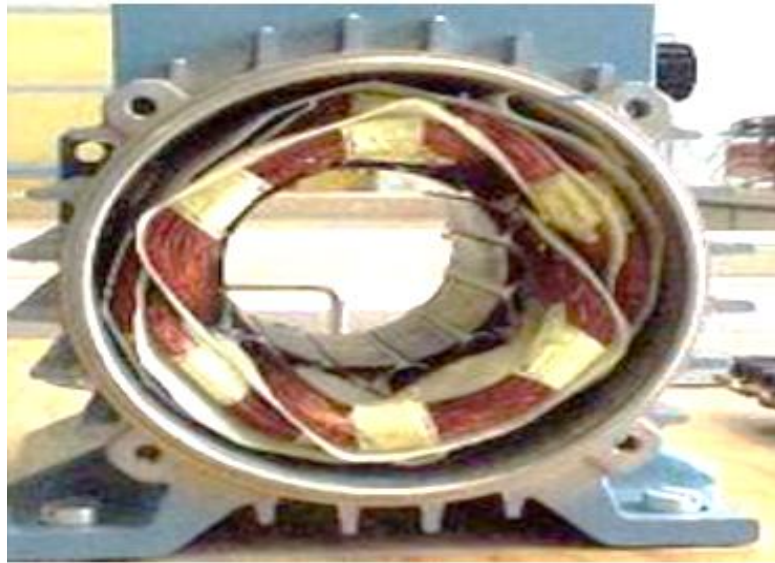
### I.2.1 Constitution :

Un moteur est constitué d'une partie fixe appelée "stator" et d'une partie tournante appelée "rotor". La figure ci-dessous, (Fig.I.1) montre une vue éclatée des différents éléments d'un moteur électrique [1,2].



### I.2.1.1 Stator (inducteur) :

Le stator est la partie statique de la machine asynchrone.



**Fig.I.2 le stator.**

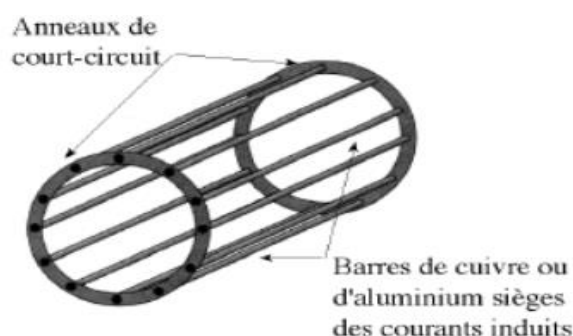
L'intérieur du stator comme il est représenté par (**Fig.I.2**), comprend essentiellement :  
Un noyau en fer feuilleté de manière à canaliser le flux magnétique. Les enroulements (ou bobinage en cuivre) des trois phases sont logés dans les encoches du ce noyau [1,2,4,5,6].

### I.2.1.2 Rotor (induit) :

Le rotor est la partie mobile. Ils existent généralement deux types de rotor [1,2,4,5,6].

#### I.2.1.2.1 Rotor à cage d'écureuil :

Il est constitué d'un cylindre de plaques d'acier avec des conducteurs, généralement de l'aluminium ou du cuivre. Ces conducteurs sont en court-circuit par des anneaux à leurs extrémités pour former une « cage » comme il est représenté par (**Fig.I.3**) [4,5].



**Fig.I.3 Structure de la cage d'écureuil.**

### I.2.1.2.2 Rotor bobiné :

Contrairement au rotor précédent, la cage est remplacée par trois enroulements couplés en étoile reliés à des bagues conductrices comme illustré par. (Fig.I.4)[4,6] .

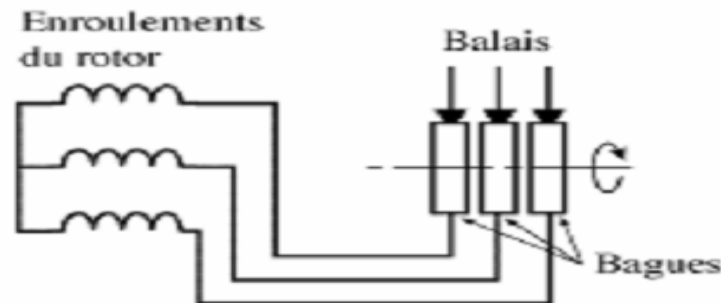


Fig.I.4 Enroulements d'un rotor bobiné couplés en étoile.

### I.2.2 Principe de fonctionnement :

Lorsque les trois bobines du stator sont alimentées, il y a création d'un champ magnétique tournant avec la vitesse  $n_s$  donnée par :

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (I.1)$$

Où :

$n_s$  : est vitesse de synchronisme (tr/ min).

$f$  : est la fréquence d'alimentation (Hz).

$p$  : est le nombre de paire de pôles.

Le champ tournant généré par le stator induit des forces électromotrices dans les conducteurs rotoriques menant à la création d'un champ rotorique. Ce champ magnétique interagit avec le champ magnétique du stator. Cette interaction produit le couple nécessaire pour faire tourner le rotor avec la vitesse  $n$ . La différence  $n_s - n$  est appelée vitesse de glissement et le rapport exprimé par :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (I.2)$$

Désigne le glissement [1,4].

**I.2.3 Etude du couple :**

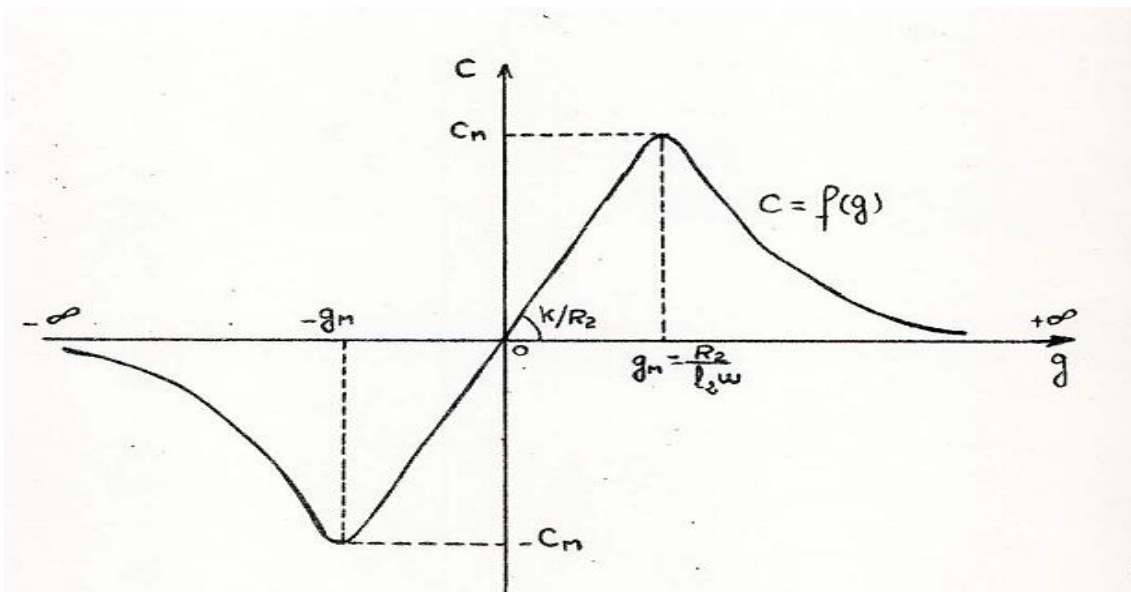
Le couple peut être exprimé comme suit :

$$C_e = \frac{kR_2}{\left(R_2^2 / g + gl_2^2 \varpi^2\right)} \tag{I.3}$$

Ou : K est une constante.

**I.2.3.1 Etude de la courbe du couple en fonction de glissement :**

La courbe  $C = f(g)$  représenté par (Fig.I.5) est symétrique par rapport à l'origine, c'est-à-dire que  $C(-g) = -C(g)$ .



**Fig.I.5 Variation du couple en fonction de glissement pendant le fonctionnement de la machine asynchrone en mode moteur et en génératrice.**

On peut remarquer aussi que :

- Pour les petits glissements, on a  $R_2^2 / g \gg gl_2^2 \varpi^2$  d'où :

$$C = K g / R_2 \tag{I.4}$$

Qui est une droite de pente  $K / R_2$ .

- Pour les glissements importants, on a :  $R_2^2 / g \ll gl_2^2 \varpi^2$  d'où

$$C = K' / g \tag{I.5}$$

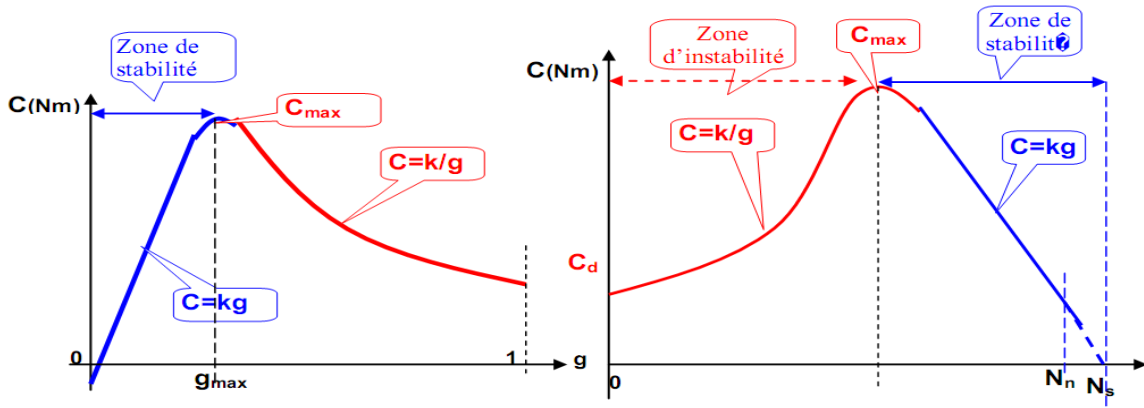
Qui est une hyperbole.

Le maximum de la courbe du couple décrit par l'équation (I.4) est obtenu lorsque la quantité  $R_2^2 / g + gl_2^2 \varpi^2$  est minimal ce qui donne :

$$g_M = R_2 / l_2 \varpi \tag{I.6}$$

ou  $l_2 \varpi$  est constant.

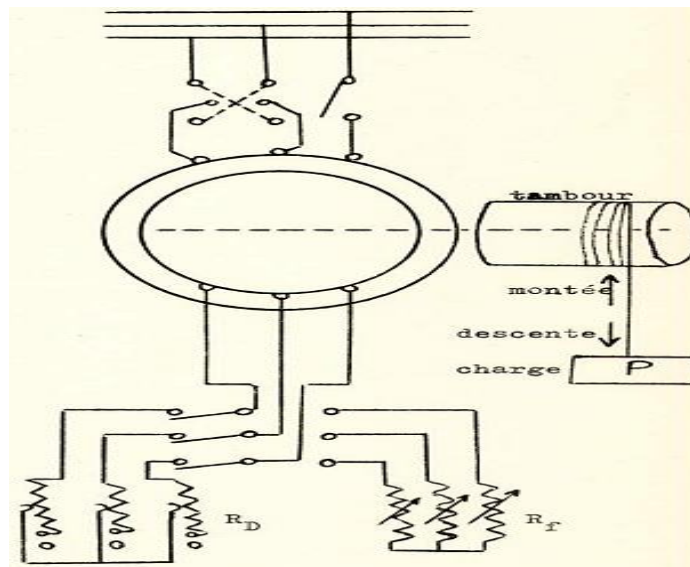
Ces observations notées sur la courbes  $C=f(g)$  peuvent être aussi signalé sur la courbe  $C=f(N)$ . Ils nous permettent de localiser les zones de stabilité et d'instabilité de la machine asynchrone comme il est montré par (Fig.I.6).



**Fig.I.6 Localisation des zones de stabilité et d'instabilité lors du fonctionnement en moteur.**

### I.2.4. Modes de fonctionnement de la machine asynchrone :

La machine asynchrone est utilisée dans les engins de levage; Elle permet divers modes de fonctionnement. Par exemple dans le fonctionnement d'une monte charge entraîné par un moteur à rotor bobiné, comme illustré par (Fig.I.7).on peut trouver la montée, la descente et le freinage. [11]



**Fig.I.7 illustration simplifié d'un système de levage par un moteur à rotor bobiné.**

- **Montée:** la machine fonctionne en moteur en développant un couple utile,  $T$ . La vitesse de rotation  $n$  est dans le même sens que celle dans du champ tournant,  $n_s$  (vitesse de synchronisme) comme il est montré par (Fig.I.8). [11]



**Fig.I.8 Sens de rotation de la machine asynchrone par rapport au champ tournant en fonctionnement moteur.**

- **Descente:** Pendant la descente le sens de rotation est inversé. La machine fonctionne en récupération. Elle est entraînée par la charge dans le sens du champ tournant. Elle dépasse la vitesse du synchronisme et fonctionne en génératrice asynchrone comme il est montré par. (Fig.I.9). [11]



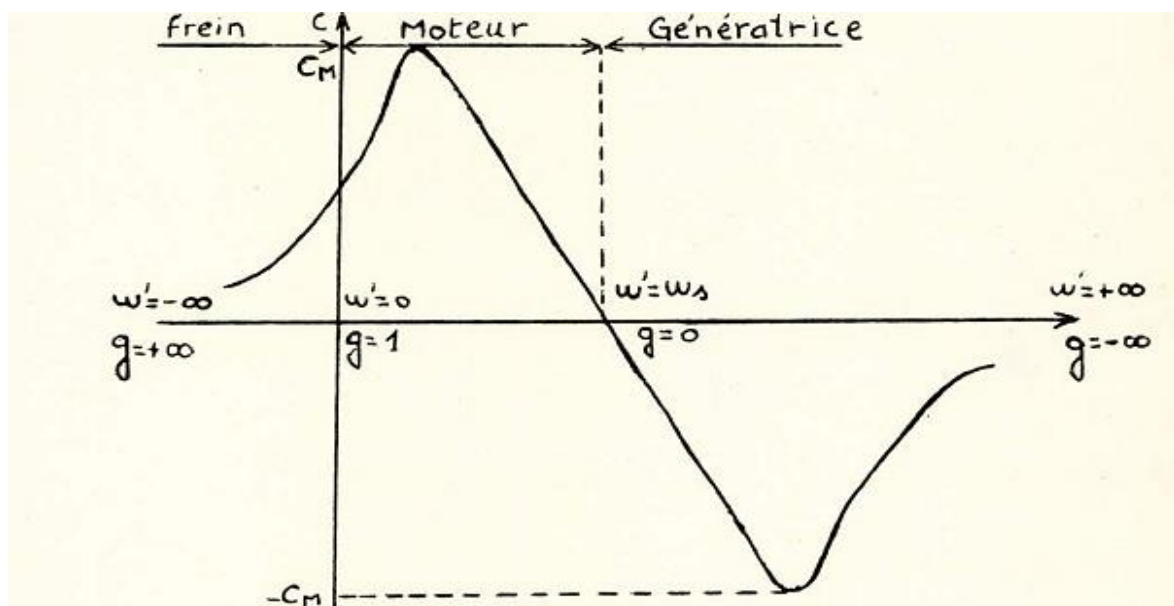
**Fig.I.9 Sens de rotation de la machine asynchrone par rapport au champ tournant en fonctionnement génératrice.**

- **Frein:** Pour arrêter la descente, il faut un fonctionnement en frein, c'est-à-dire inverse du sens du champ tournant comme il est montré par. (Fig.I.10). [11]



**Fig.I.10 Sens de rotation de la machine asynchrone par rapport au champ tournant en fonctionnement frein.**

La caractéristique mécanique représentée par (Fig.I.11) généralise le fonctionnement de la machine asynchrone.



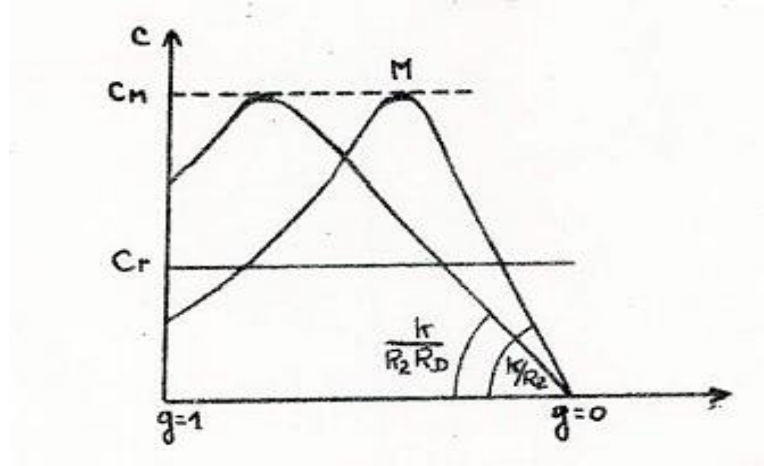
**Fig.I.11 caractéristique mécanique généralisée de la machine asynchrone.**

On peut observer qu'on a :

- Fonctionnement en moteur (de  $g=0$  à  $g=1$ )
- Fonctionnement en génératrice ( $g=-\infty$  à  $g=0$ )
- Fonctionnement en frein ( $g=1$  à  $g=+\infty$ )

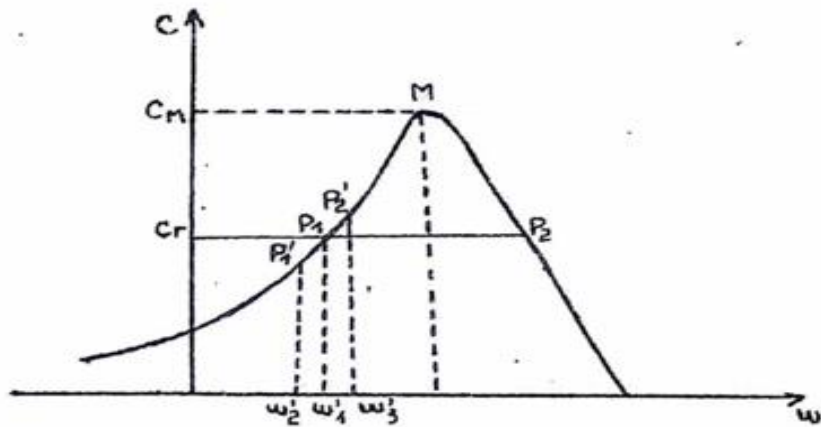
**I.2.4.1 Stabilité lors de fonctionnement en mode moteur :**

La machine fonctionne en moteur de l'arrêt ( $g=1$ ), jusqu'au synchronisme ( $g=0$ ). Pour le fonctionnement moteur  $n$  est inférieur à  $n_s$ . Selon la caractéristique représentée par (Fig.I.12).



**Fig.I.12 Effet de l'insertion de la résistance de démarrage avec la résistance rotorique.**

On peut remarquer que la valeur du couple maximal  $C_M$  est constante quelle que soit la résistance du rotor. Mais on peut noter que l'on peut améliorer le couple en introduisant une résistance supplémentaire  $R_D$  au rotor. De même selon (Fig.I.13) représentée ci-dessous :



**Fig.I.13 Courbe descriptive de la stabilité du fonctionnement en mode moteur.**

On peut connaître la stabilité de la machine en fonctionnement moteur. Si à la suite d'une variation (tension, couple résistante ...), le point  $P_1$  se déplace en  $P'_1$  alors  $C_e - C_r < 0$  donc la vitesse tend à diminuer

Par contre si la variation se fait dans l'autre sens c'est-à-dire  $P_1$  en  $P'_2$

Alors :

$C_e - C_r > 0$  et par conséquent la vitesse va tendre à augmenter plus, donc  $P_1$  est un point de fonctionnement instable.

Le même raisonnement permet de constater que  $P_2$  est un point de fonctionnement stable.

La partie ascendante jusqu'en M est donc une partie de fonctionnement stable, tandis que la partie descendante est une partie de fonctionnement stable.

### I.2.4.2 Stabilité lors de fonctionnement en mode frein :

La courbe représentée par (Fig.I.14) nous permet d'étudier la stabilité de ce fonctionnement.

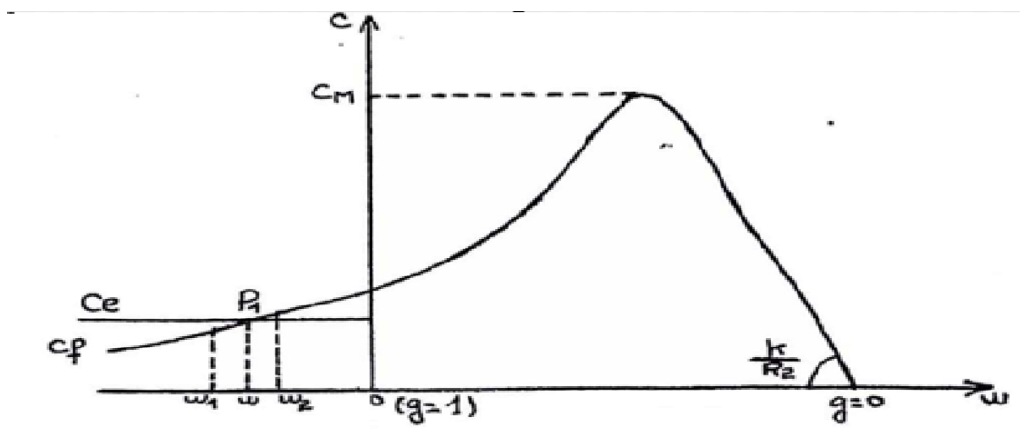


Fig.I.14 Courbe descriptive de la stabilité en fonctionnement en mode frein.

Pour une petite augmentation de la vitesse ( $\omega_2$  supérieure à  $\omega$ , la différence  $C_e - C_f$  est positive ou  $C_f$  est un couple de freinage,  $C_e$  est le couple électromagnétique et  $C_M$  est le couple maximal. La vitesse tend à augmenter encore plus. Le même raisonnement s'applique pour une diminution de la vitesse. On peut donc dire qu'un tel fonctionnement est impossible avec une machine à rotor en court-circuit. Pour cela il faut insérer une résistance  $R_f$  (beaucoup plus grande que  $R_D$ , résistance de démarrage) dans le circuit du rotor qui fait déplacer le point M vers les glissements  $g$  supérieur.

On voit donc que les machines destinées à un tel fonctionnement doivent être à rotor bobiné.

### I.2.4.3 Stabilité lors de fonctionnement en mode génératrice :

Dans le cas de la génératrice, le même raisonnement qu'en mode moteur (les deux courbes sont symétriques par rapport à l'origine).

**I.3 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description simple de la machine asynchrone en particulier sa construction et son principe de fonctionnement. Nous avons également mené une étude sur la caractéristique mécanique de cette machine pendant les trois modes de fonctionnement. Une étude simple de la stabilité a été rappelée. Le chapitre suivant sera réservé à l'étude du schéma équivalent de la machine asynchrone.

## *Chapitre II*

### *Schéma équivalent de la machine asynchrone*

---

## **Sommaire Chapitre II:**

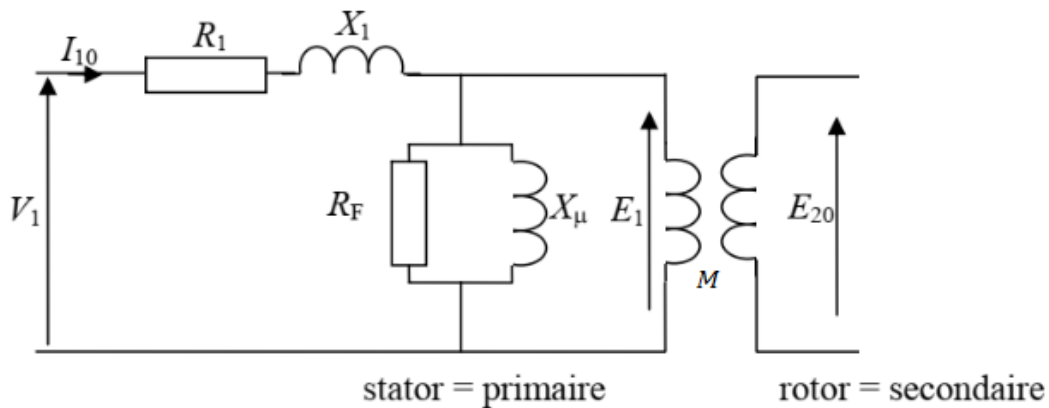
II .1 Introduction.	18
II .2 Fonctionnement à Rotor ouvert.	18
II .3 Fonctionnement en rotation.	19
II .4 Détermination des paramètres électriques du schéma équivalent.	22
II .4.1 Paramètres typiques du moteur à rotor bobiné choisi.	22
II .4.2 Résultats d'essais nécessaires.	22
II .4.2.1 Résultats de l'essai à vide.	22
II .4.2.2 Résultats de l'essai à rotor bloqué.	23
II .4.2.3 Mesure des résistances des enroulements statorique $R_1$ et rotorique $R_2$	23
II .5 Bilan de puissance dans le cas des trois modes de fonctionnement.	26
II .6 Conclusion.	26

## II .1 Introduction:

Par le schéma équivalent on désigne un circuit électrique permettant de modéliser une machine asynchrone triphasé réelle. Dans ce contexte le modèle du transformateur peut être utilisé. Comme la construction de la génératrice asynchrone ne diffère fondamentalement de celle du moteur asynchrone, les paramètres de ce schéma ne dépendent pas du mode de fonctionnement. Ces paramètres peuvent être déterminés en utilisant les résultats de trois essais à savoir l'essai à vide, l'essai à rotor bloqué et les mesures des résistances des enroulements statorique,  $R_1$  et rotorique  $R_2$ .

## II .2 Fonctionnement à Rotor ouvert :

Si le circuit du rotor (secondaire) est ouvert comme il est représenté par (**Fig.II.1**), le moteur ne tourne pas, il se comporte comme un transformateur.



**Fig.II.1** Schéma équivalent du moteur asynchrone à rotor ouvert.

L'équation d'une phase primaire peut s'écrire :

$$V_1 = R_1 I_{10} + j l_1 \omega \cdot I_{10} + E_1 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$X_1 = j l_1 \omega \quad (\text{II.2})$$

Où  $R_1$  est la résistance de l'enroulement d'une phase du stator et  $X_1$  est la réactance de fuite de ce même enroulement.

$I_{10}$  : le courant statorique à rotor ouvert.

$R_F$  : résistance fictive représentant les pertes fer.

$X_\mu$  : réactance réelle servant à représenter la puissance réactive requise pour produire la magnétisation.

II .3 Fonctionnement en rotation :

Dans ce cas le rotor est en court-circuit comme il est montré par (Fig.II.2).

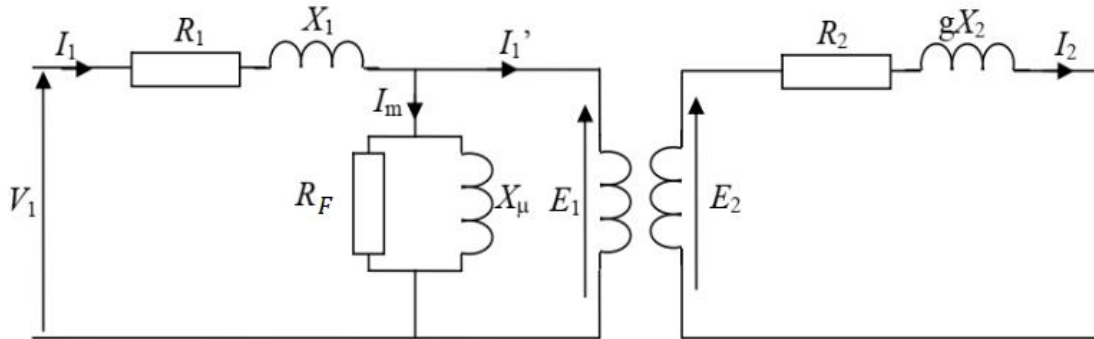


Fig.II.2 Schéma équivalent du moteur asynchrone à rotor en court-circuit.

Ou:

$R_2$  : est la résistance d'une phase rotorique.

$X_2$  : est la réactance d'une phase rotorique. Elle est exprimée par :

$$X_2 = j l_2 \omega \tag{II.3}$$

$I_m$  : le courant de magnétisation.

La fréquence  $f_2$  des courants rotoriques dépend du glissement comme suit

$$f_2 = g . f \tag{II.4}$$

Cette fréquence variable a un effet direct sur la réactance  $X_2$  qui selon l'équation (II.3) prendra la valeur  $g X_2$ .

De même cet effet est aussi inévitable sur les f.e.m induites au rotor (secondaire) ou

$$E_2 = g . E_{20} \tag{II.5}$$

Pour une phase du stator :

$$V_1 = R_1 I_1 + j l_1 \omega . I_1 + E_1 = (R_1 + j X_1) . I_1 + E_1 \tag{II.6}$$

Pour une phase du rotor :

$$V_2 = 0 = E_2 - R_2 I_2 - j g X_2 . I_2 \tag{II.7}$$

La division par  $g$  nous mène à écrire :

$$\underline{E}_2 = (R_2 + j g X_2) . \underline{I}_2 = g . \underline{E}_{20} \tag{II.8}$$

$$\underline{E}_{20} = \frac{R_2}{g} . \underline{I}_2 + j X_2 . \underline{I}_2 \tag{II.9}$$

Et le schéma équivalent précédent peut être représenté par (Fig.II.3).

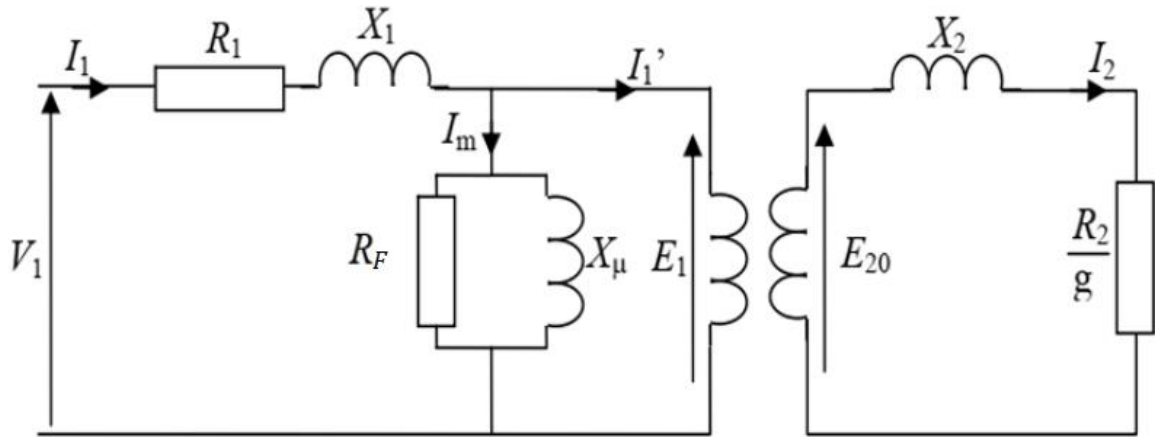


Fig.II.3 autre forme du schéma équivalent du moteur asynchrone.

En ramenant les éléments rotoriques au stator, on obtient le schéma équivalent illustré par (Fig.II.4).

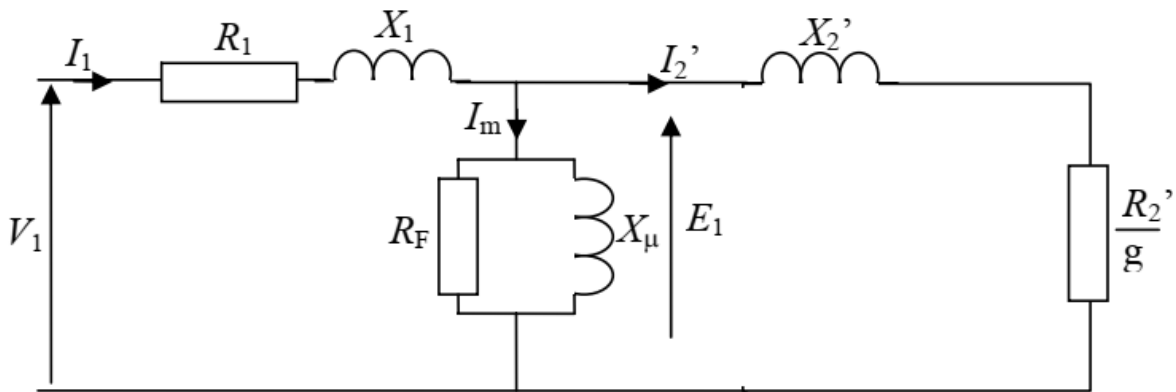


Fig.II.4 Schéma équivalent du moteur asynchrone ramené au stator.

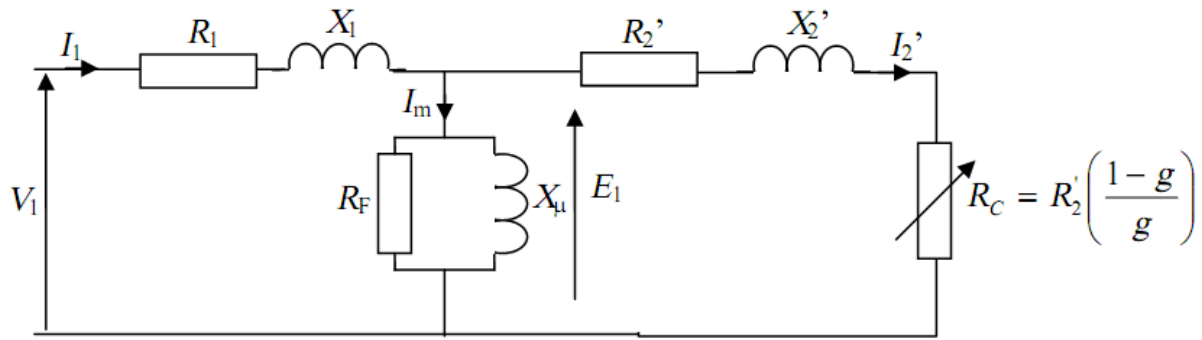
Ou:

$R_2' = \frac{R_2}{m^2}$  : est la résistance ramenée au stator d'un enroulement rotorique.

$X_2' = \frac{X_2}{m^2}$  : est la réactance ramenée au stator d'un enroulement rotorique.

m : est le rapport de transformation.

La séparation de la résistance du rotor correspondant aux pertes joules de la résistance liée à la conversion d'énergie nous permet de donner une autre forme du schéma équivalent qui peut être représenté par (Fig.II.5).



**Fig.II.5** Schéma équivalent du moteur asynchrone ramenée au stator avec Décomposition de la puissance électromécanique et des pertes joules rotoriques.

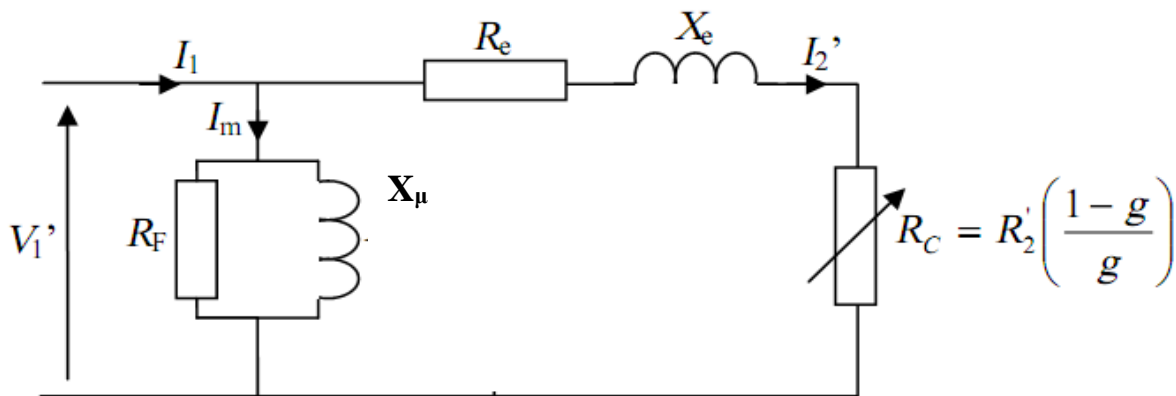
Ou:

$R_c = \frac{R_2'(1-g)}{g}$  : est une résistance fictive variable qui représente le taux de la conversion

d'énergie électromécanique.

Finalement, le circuit équivalent approximatif qui peut être utilisé est représenté par (**Fig.II.6**). Ou  $V_1'$  est la tension simple statorique moins la chute aux bornes de l'impédance d'un enroulement du stator. [3].

$$Z_1 = R_1 + jX_1$$



**Fig.II.6** Schéma équivalent approximatif ramenée au stator du moteur asynchrone.

Ou:

$$R_e = R_1 + R_2' \quad \text{et} \quad X_e = X_1 + X_2'$$

## II .4 Déterminations des paramètres du schéma équivalent:

### II .4.1 Paramètres typiques du moteur à rotor bobiné choisi :

Le moteur asynchrone choisi a les paramètres groupés dans le tableau suivant [10] :

Tension nominale (U)	500 V
Puissance utile (Pu) (voulue)	70 kW
Fréquence (f)	50 Hz
Nombre de pôles	8 pôles
Type de marche	Continue

**Tableau.II.1 Paramètres du moteur à rotor bobiné choisi.**

### II .4.2 Résultats des essais nécessaires :

Pour la détermination des différents paramètres du schéma équivalent, trois essais sont nécessaires :

#### II .4.2.1 Résultats de l'essai à vide :

On fait tourner le moteur à vide sous sa tension nominale. On mesure ainsi  $P_0$ ,  $I_0$  et  $U_0$ . Les résultats de l'essai à vide sont groupés dans le tableau ci-dessous [10].

Tension composée statorique (U)	500 V
Courant à vide ( $I_0$ )	29 A
Puissance absorbée ( $P_0$ )	2100 W

**Tableau.II.2 Mesures relevées lors d'un essai à vide.**

A partir de ces résultats on détermine  $R_F$  et  $X_\mu$  et en déduire  $L_\mu$  :

$$R_F = \frac{v_0}{(I_0 \cdot \cos \varphi_0)}$$

$$R_F = \frac{288,675}{(29 \cdot 0,0836)} = 119,070 \Omega$$

$$X_\mu = L_\mu \omega = \frac{v_0}{(I_0 \cdot \sin \varphi_0)}$$

$$X_\mu = \frac{288,675}{(29 \cdot 0,9964)} = 9,894 \Omega$$

$$L_\mu = 0,031 \text{ H}$$

**II .4.2.2 Résultats de l’essai en court-circuit (à rotor bloqué) :**

L’alimentation sous tension nominale U ne peut se faire à rotor bloqué pour les moteurs très puissants car les intensités seraient très élevées. On alimente donc le moteur sous une tension réduite  $U'_{cc}$  après avoir bloqué le rotor de telle sorte que le courant de court-circuit ne dépasse pas le courant nominal du moteur. On mesure ainsi  $P'_{cc}, I'_{cc}, U'_{cc}$  qui seront ramenés à la tension nominale U et prendront respectivement les valeurs suivantes.

$$I_{cc} = I'_{cc} \frac{U}{U'_{cc}} \tag{II.10}$$

$$P_{cc} = P' \left( \frac{U}{U'_{cc}} \right)^2 \tag{II.11}$$

Les résultats de l’essai à rotor bloqué sont groupés dans le tableau ci-dessous [10].

Tension statorique $U'_{cc}$	160 V
Courant de court-circuit $I'_{cc}$	115 A
Puissance absorbée $P'_{cc}$	7500 W

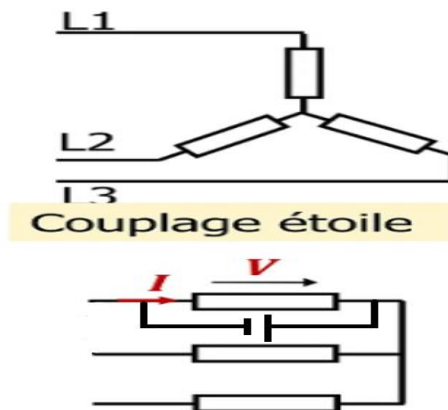
**Tableau.II.3 Mesures relevées lors de l’essai à rotor bloqué.**

**II .4.2.3 Mesure des résistances statorique  $R_1$  et rotorique  $R_2$  :**

Plusieurs méthodes sont employées pour la mesure des résistances. Nous mentionnons que ces mesures sont faites à chaud par méthode volt-ampérométrique en continu.

- **Mesure de la résistance d’une phase du stator :**

Pour un couplage étoile des enroulements du stator comme il est représenté par (Fig.II.7) [8].



**Fig.II.7 illustration du schéma de la mesure de la résistance d’un enroulement du stator couplé étoile.**

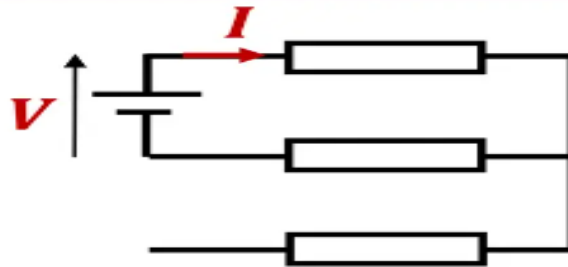
On mesure les valeurs de V et I plusieurs fois sans dépasser  $I_n$ . On mesure la résistance d'un enroulement du stator correspondante à chaque couple  $(V_i, I_i)$ . La valeur de  $R_1$  sera donnée par :

$$R_1 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{V_i}{I_i} \right) / n \tag{II.12}$$

Où n est le nombre de répétition de la mesure.

- **Mesure de la résistance d'une phase du rotor :**

Dans le cas du rotor, on ne peut pas mesurer directement la résistance des enroulements, comme le cas du stator. On a donc recours à la mesure des deux résistances des enroulements du rotor couplé en étoile comme il est représenté par (Fig.II.8).



**Fig.II.8** illustration du schéma de la mesure de la résistance d'un enroulement du rotor couplé en étoile.

En effectuant la même procédure du mesure, la valeur de  $R_2$  peut être donnée par :

$$R_2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{V_i}{I_i} \right) / 2n \tag{II.13}$$

Les valeurs des résistances des enroulements du stator et de rotor mesurées à température ambiante seront corrigées comme suit :

$$R_0 = R_{am} (1 + \alpha (T_0 - T_{am})) \tag{III.14}$$

$\alpha$  : C'est une constante donnée ( $\alpha = 4.0141 \cdot 10^{-3}$ )

Les valeurs des deux résistances respectivement aux températures correspondantes sont groupées dans le tableau suivant

La valeur de résistance à 20°C	La valeur de résistance à 90°C
$R_1 = 0.13 \Omega$ (entre bornes)	$R_1 = 0.166 \Omega$
$R_2 = 0.042 \Omega$ (entre bagues)	$R_2 = 0.053 \Omega$

**Tableau.II.4** Valeurs des résistances à la température de service.

Connaissant  $R_1$ , il est très facile d'en tirer les valeurs de  $R_2'$ ,  $X_2'$ ,  $R_e$  et  $X_e$

de la façon suivante [8] :

La puissance active absorbée  $P_{cc}$  est entièrement perdue par effet joule au stator et au rotor donc

$$R'_2 = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} - R_1$$

$$P_{cc} = \sqrt{3} * U_{cc} * I_{cc} * \cos \varphi_{cc} = 73137,53 \text{ W}$$

$$R'_2 = \frac{73137,53}{3 (359,37)^2} - 0,166$$

$$R'_2 = 0,0227 \Omega$$

En négligeant l'influence de l'inductance de fuites stator, on détermine la réactance  $X'_2$  comme suit :

$$X'_2 = \frac{Q_{cc}}{3I_{cc}^2}$$

$$Q_{cc} = \sqrt{3} U_{cc} I_{cc} \sin \varphi_{cc} \\ = \sqrt{3} * 500 * 359 * 0.971$$

$$Q_{cc} = 302198,066 \text{ VAR}$$

$$X'_2 = \frac{302198,066}{3 (359,37)^2}$$

$$X'_2 = 0,779 \Omega$$

$$R_e = R_1 + R'_2 = 0,166 + 0,0227$$

$$R_e = 0,1937 \Omega$$

$$X_e = X_1 + X'_2$$

On néglige  $X_1$ , C'est à dire:

$$X_e = X'_2 = 0,779 \Omega$$

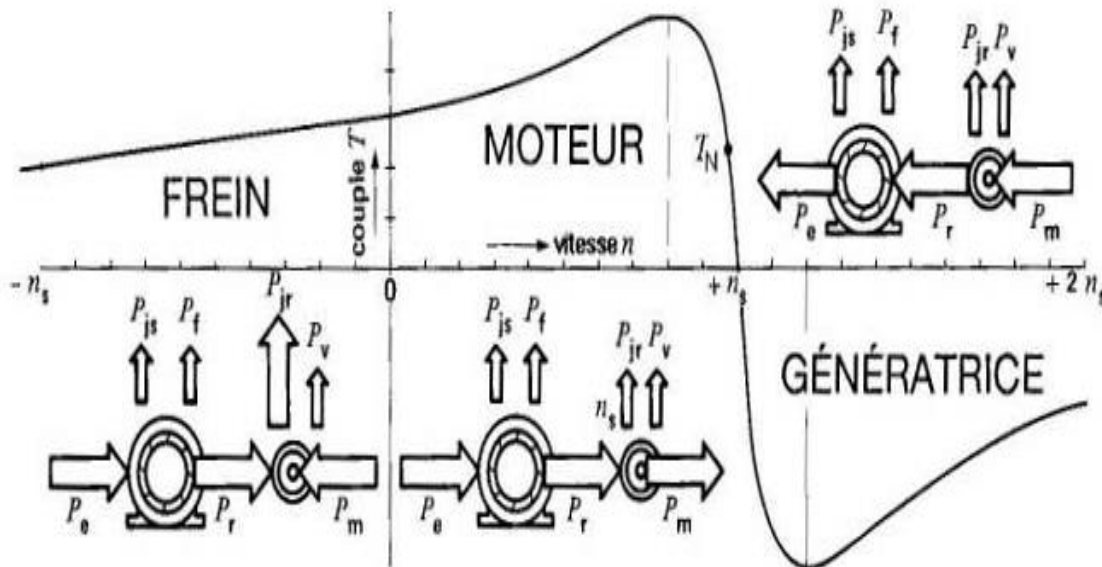
Les valeurs des différents paramètres sont groupées dans le tableau suivant:

$R_F$	119,070 $\Omega$
$X_\mu$	9,894 $\Omega$
$L_\mu$	0,031 H
$R'_2$	0,0227 $\Omega$
$X'_2$	0,779 $\Omega$
$R_e$	0,1937 $\Omega$
$X_e$	0,779 $\Omega$

**Tableau.II.5 Paramètres du schéma équivalent issus des essais à vide et à rotor bloqué.**

## II .5 Bilan de puissance dans le cas des trois modes de fonctionnement :

Le cheminement de la puissance lors du fonctionnement de la machine asynchrone dans les trois modes peut être décrit par (Fig.II.9).



**Fig.II.9** cheminement de la puissance lors de fonctionnement de la machine asynchrone en divers modes.

Ou :

$P_e$  : puissance électrique.

$P_{js}$  : pertes joules statoriques.

$P_{jr}$  : pertes joules rotorique.

$P_v$  : pertes d'aération et de friction (pertes mécaniques).

$P_m$  : puissance mécanique.

$P_{tr}$  : puissance transmise.

$P_f$  : pertes fer.

## II .6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons mené une description simple du schéma équivalent de la machine asynchrone triphasé. Nous avons rappelé brièvement les différents essais permettant la détermination des paramètres de ce schéma. Nous avons évoqué une description du bilan de puissance en fonctionnement moteur, génératrice et frein. La clôture était réservée à une conclusion.

*Chapitre III :*  
*Construction et exploitation de diagramme circulaire*  
*complet*

---

### **Sommaire Chapitre III :**

III .1 Introduction.	29
III .2 Formes de l'équation du cercle.	29
III .2.1 Forme rayon-centre.	29
III .2.2 Forme développé.	29
III .3 Hypothèse de Kapp et équation du cercle.	30
III .4 construction de diagramme de cercle.	31
III .4.1 Calculs préliminaires.	31
III .4.2 Procédure de construction.	32
III .4.3 Exploitation du diagramme de cercle.	35
III .5 construction de diagramme circulaire en utilisant un programme Matlab.	38
III .6 Relevé des caractéristiques en fonctionnement moteur.	40
III .7 Conclusion.	46

### III .1 Introduction :

Après avoir développé le schéma équivalent dans le chapitre précédent, nous essayons dans ce troisième chapitre de décrire la méthode de construction du diagramme du cercle ou circulaire en se basant sur les résultats des essais présentés au chapitre précédent. Nous exploitons cette construction pour déterminer les résultats liés au point du fonctionnement nominal du moteur. Nous essayons aussi de relever des caractéristiques de fonctionnement en particulier les caractéristiques mécaniques en fonctionnement moteur et génératrice asynchrone.

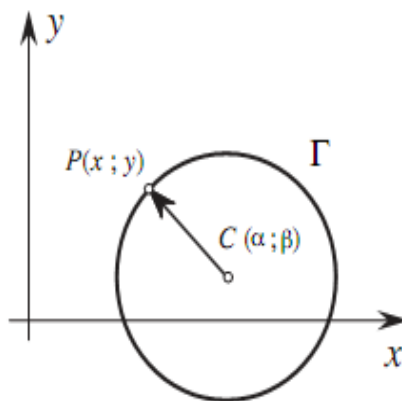
### III .2 Formes de l'équation du cercle :

On distingue deux formes de l'équation du cercle :

#### III .2.1 Forme rayon-centre :

Soit  $\Gamma$  un cercle de centre  $C(\alpha; \beta)$ , le point  $p(x; y) \in \Gamma$  donc  $\|CP\| = R$ . L'équation cartésienne de cercle sera décrite par :

$$(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 = R^2 \quad (\text{III.1})$$



**Fig.III.1 Cercle  $\Gamma$  centré en  $C$  et de rayon  $R$ .**

#### III .2.2 Forme développé :

On rencontrera aussi l'équation de cercle sous la forme développée suivante :

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (\text{III.2})$$

### III .3 Hypothèse de Kapp et équation du cercle :

Une forme simple du schéma équivalent est celle où l'hypothèse de Kapp est considérée. Elle est représenté par le schéma équivalent suivant :

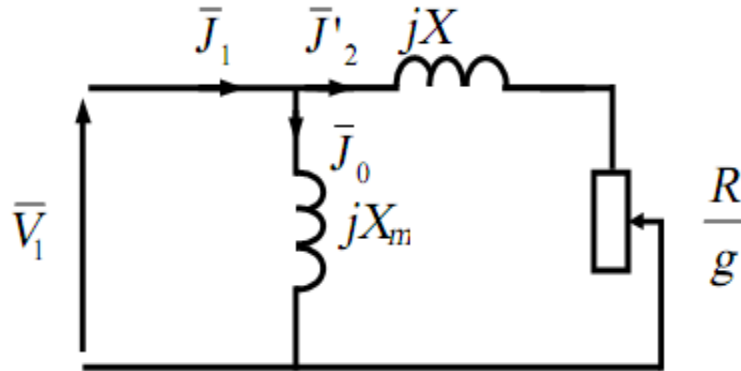


Fig.III.2 schéma équivalent simplifié.

Le courant magnétisant est donné par :

$$J_0 = \frac{V_1}{X_m} e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad \text{(III.3)}$$

Le courant secondaire ramené au stator est donné par

$$J_2' = \frac{V_1}{Z} e^{-j\varphi_2} \quad \text{(III.4)}$$

Où  $\varphi_2$  peut être exprimé par

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X}{R/g} \quad \text{(III.5)}$$

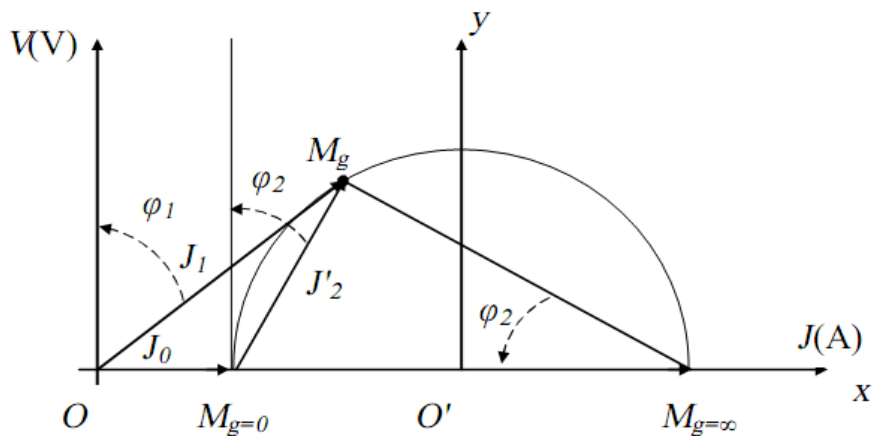


Fig.III.3 diagramme vectoriel simplifié [3].

- D'après le schéma équivalent précédent on a :

$$J_2' = \frac{V_1}{\sqrt{\left(\frac{R}{g}\right)^2 + X^2}} \quad \text{(III.6)}$$

- Pour une glissement nul ( $g=0$ ) on a  $\varphi_2 = 0$   $J_2' = 0$

- Pour une glissement qui tend vers l'infini ( $g \rightarrow \infty$ ) on a  $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$  et  $J_2' = \frac{V_1}{X}$

- On choisit un repère  $(O', x, y)$  de centre  $O'$ , tels que les deux points suivants  $M_{g=0}$

et  $M_{g=\infty}$  ont respectivement les coordonnées suivantes  $\left(-\frac{V_1}{2X}, 0\right)$  et  $\left(\frac{V_1}{2X}, 0\right)$

- Selon (**Fig. III 3**) on peut associer au point  $M_g$  les coordonnées suivantes

$$x = -\frac{V_1}{2X} + J_2' \sin \varphi_2 \quad \text{(III.7)}$$

$$y = J_2' \cos \varphi_2$$

- On peut facilement déduire la relation suivant :

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{V_1}{2X}\right)^2 \quad \text{(III.8)}$$

Qui représente l'équation d'un cercle de centre  $O'(0,0)$  et de rayon  $\frac{V_1}{2X}$

### III .4 construction de diagramme de cercle :

#### III .4.1 Calculs préliminaires :

Les calculs préliminaires issus des résultats de l'essai à vide sont groupés dans le tableau ci-dessous.

Calculs préliminaires
$\cos \varphi_0 = 0.0836$

**Tableau.III.1 résultats des calculs préliminaires issus de l'essai à vide.**

Les calculs préliminaires issus des résultats de l'essai à rotor bloqué sont groupés dans le tableau ci-dessous

Calculs préliminaires
$\cos \varphi_{cc} = 0.235$
$I_{cc} = 359.37 \text{ A}$
$U_{cc} = 500 \text{ V}$
$P_{cc} = 73137,53 \text{ W}$

**Tableau.III.2 résultats des calculs préliminaires issus de l'essai à rotor bloqué.**

### III .4.2 Procédure de construction de diagramme circulaire:

Le diagramme de cercle que nous procédons de construire est recommandé par l'U.T. E (union technique des électriciens). Il est toujours établi pour un seul enroulement du stator. On trace deux axes rectangulaires (ox, oy), sur l'axe oy nous prenons  $OO' = 50\text{mm}$  avec  $O'$  c'est le centre d'un arc de cercle ayant pour rayon.  $OO'$ . [12]

On prend comme échelle de courant  $1 \text{ cm} \rightarrow 12,5 \text{ A}$

Nous plaçons les points a et b sur l'arc tels que

$$Oa = 100 * \cos \varphi_0 = 8.36\text{mm} \quad \text{et} \quad Ob = 100 * \cos \varphi_{cc} = 23.5\text{mm}$$

**a) Localisation de point de fonctionnement à vide :**

Sur le prolongement de  $Oa$ , on place le point  $M_0$  (point issu de l'essai à vide) tel que

$$OM_0 = \frac{29}{12,5} = 2,32 \text{ cm}$$

**b) Localisation de point de fonctionnement à rotor bloqué :**

Sur le prolongement de  $Ob$ , on place le point  $M_{cc}$  (point issu de l'essai à rotor bloqué) tel que

$$OM_{cc} = \frac{359,37}{12,5} = 28,75 \text{ cm}$$

**c) Localisation du point de fonctionnement nominal :**

$$OM = 8,45 \text{ cm} \quad \text{d'où} \quad I_a = 12,5 * 8,45 = 105,625 \text{ A}$$

**d) Courant active ( $I_{act}$ ) :**

$$MM' = 7,5 \text{ cm} \rightarrow I_{act} = 7,5 * 12,5 = 93,75 \text{ A}$$

**e) Facteur de puissance :**

$$\cos \varphi = \frac{MM'}{OM} = \frac{93.75}{105.625} = 0.887$$

Sur la droite  $M_{cc} H$ , nous portons :

$$HP = \frac{I_{cc} \cos(\varphi_{cc})}{12,5} = 2,96 \text{ cm}$$

**f) Construction de la droite des puissances :**

En reliant les deux points  $M_0$  et  $M_{cc}$  nous obtiendrons la droite des puissances utiles ( $M_0M_{cc}$ ).

**g) Détermination du centre de cercle :**

La perpendiculaire au milieu de  $M_0 M_{cc}$  la coupe en un point D. Cette droite va couper la droite ( $M_0R$ ) qui est parallèle à l'axe ( $ox$ ) en C qui est le centre de cercle. Qui est le centre de cercle. Ce résultat est valable pour les puissances  $P > 15 \text{ kw}$ . Dans le cas où  $P < 15 \text{ kw}$ , il faut faire une correction. Le centre du cercle sera localisé sur la même droite mais avec une inclinaison  $\gamma$  donnée par :

$$\gamma = \frac{2R_1 I_0 \sin \varphi_0}{V} \tag{III.9}$$

**h) Construction de la droite des couples utiles :**

Nous traçons le cercle de centre C et de rayon  $M_0C$ . Par  $M_{cc}$  menons la perpendiculaire à  $ox$ , elle le rencontre en H. Sur la droite ( $M_{cc}H$ ) nous portons.

$$HP = \frac{R_1 I_{cc}^2}{V} \tag{III.10}$$

Nous relient les points  $M_0$  et P et nous prolongeons la droite ( $M_0P$ ) jusqu'elle rencontre le cercle au point à glissement infini  $M_g (g = \pm \infty)$ . Cette droite est appelée droite des couples.

**i) Détermination du glissement :**

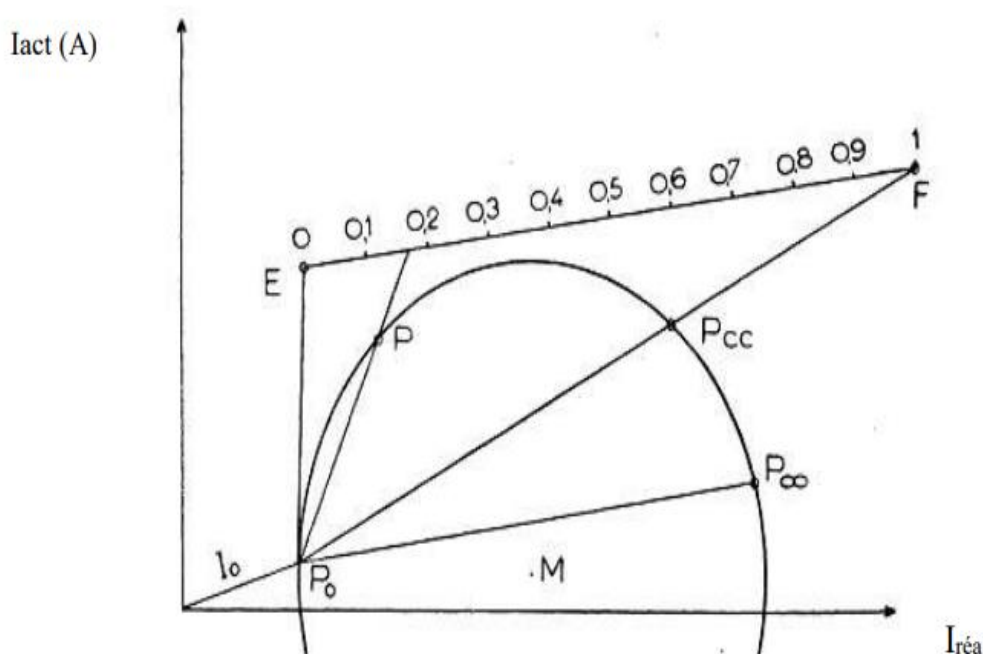
Nous expliquons dans ce qui suit une des méthodes pour la détermination graphique du glissement pour n'importe quel point de fonctionnement. Cette méthode est illustrée par la (**Fig.III.4**). Le glissement peut être lu sur une droite parallèle à la droite des puissances.

Le glissement  $g=0$  aura lieu lorsque le point de fonctionnement P est confondu avec le point  $P_0$ . En traçons la tangente au cercle au point  $P_0$ . La droite ( $P_0P_{cc}$ ) rencontre la droite de

glissement(EF) en F. En fonctionnement moteur, le segment [EF] sera gradué en cent parties égales ou le glissement  $g=0$  en E et  $g=1$  en F

La détermination du glissement pour un point de fonctionnement P sera obtenue en prolongeant la droite (P<sub>0</sub>P) qui rencontrera la droite (EF) en un point qui représentera le glissement au point de fonctionnement P.

Dans ce mémoire nous avons opté pour la détermination du glissement à l'exploitation de la relation liant la puissance  $P_{em}(P_{tr})$  et les pertes joules rotoriques.



**Fig.III.4 illustration graphique de la détermination du glissement.**

En suivant les étapes précédentes de la construction, la représentation graphique du diagramme circulaire est illustrée par **Fig.A1** en **Annexe A** :

### III .4.3 Exploitation du diagramme de cercle :

**a) Puissance utile ( $P_u$ ) :**

$$MN = 6,3 \text{ cm} \rightarrow MN = 6,3 * 12,5 = 78,75 \text{ A}$$

$$P_u = \sqrt{3} * U * MN = 68,2 \text{ KW}$$

**b) Pertes joules rotoriques ( $P_{jr}$ ) :**

$$NS = 0,2 \text{ cm} \rightarrow P_{jr} = \sqrt{3} * U * NS = 2,165 \text{ KW}$$

**c) Pertes statoriques ( $P_{st}$ ) :**

$$ST = 0,2 \text{ cm} \rightarrow P_{st} = P_{jst} - P_{js0} = \sqrt{3} * U * ST = 2,165 \text{ KW}$$

**d) Puissance transmise au rotor ( $P_{tr}$ ) :**

$$MS = 6,5 \text{ cm} \rightarrow P_a - P_{st} = 70,364 \text{ KW}$$

**e) Calcul de glissement :**

Le glissement est donc :

$$P_{jr} = g * P_{em}$$

$$g = \frac{P_{jr}}{P_{em}} = \frac{NS}{MS} = \frac{2,5}{81,25} = 0,0307$$

Soit :

$$g = 3,07 \%$$

**f) Couple utile ( $T_u$ ) :**

La droite MM' se croise avec la droite du couple utile sur le point S ; donc on va mesurer MS. C'est la distance correspondante au courant consommé au point de fonctionnement de la puissance utile.

La valeur de MS en cm est :

$$MS = 6,5 \text{ cm}$$

La vitesse de synchronisme du moteur ( $\omega_s$ ) exprimée en (rad/s) est donné par:

$$\omega_s = \frac{2 * \pi * f}{p} = \frac{2 * 3,14 * 50}{4} = 78,5 \text{ rad/s}$$

$$\omega = \omega_s * (1 - g)$$

$$\omega = 78,5 * (1 - 0,0307)$$

$$\omega = 76,22 \text{ rad/s}$$

Maintenant, on peut calculer le couple utile ( $T_u$ ) :

$$T_u = \frac{M_s * V}{\omega} = \frac{6.5 * 12.5 * 3 * 288}{76.22} = 923Nm$$

En connaissant le point nominal, les résultats des essais à vide et à rotor bloqué ainsi que les valeurs des résistances  $R_1$  et  $R_2$ . Nous pouvons élaborer un programme Matlab pour tracer et voir l'évolution des différentes caractéristiques de la machine asynchrone en particulier en mode moteur et génératrice. Le déroulement de ce programme est effectué selon l'organigramme ci-dessous.

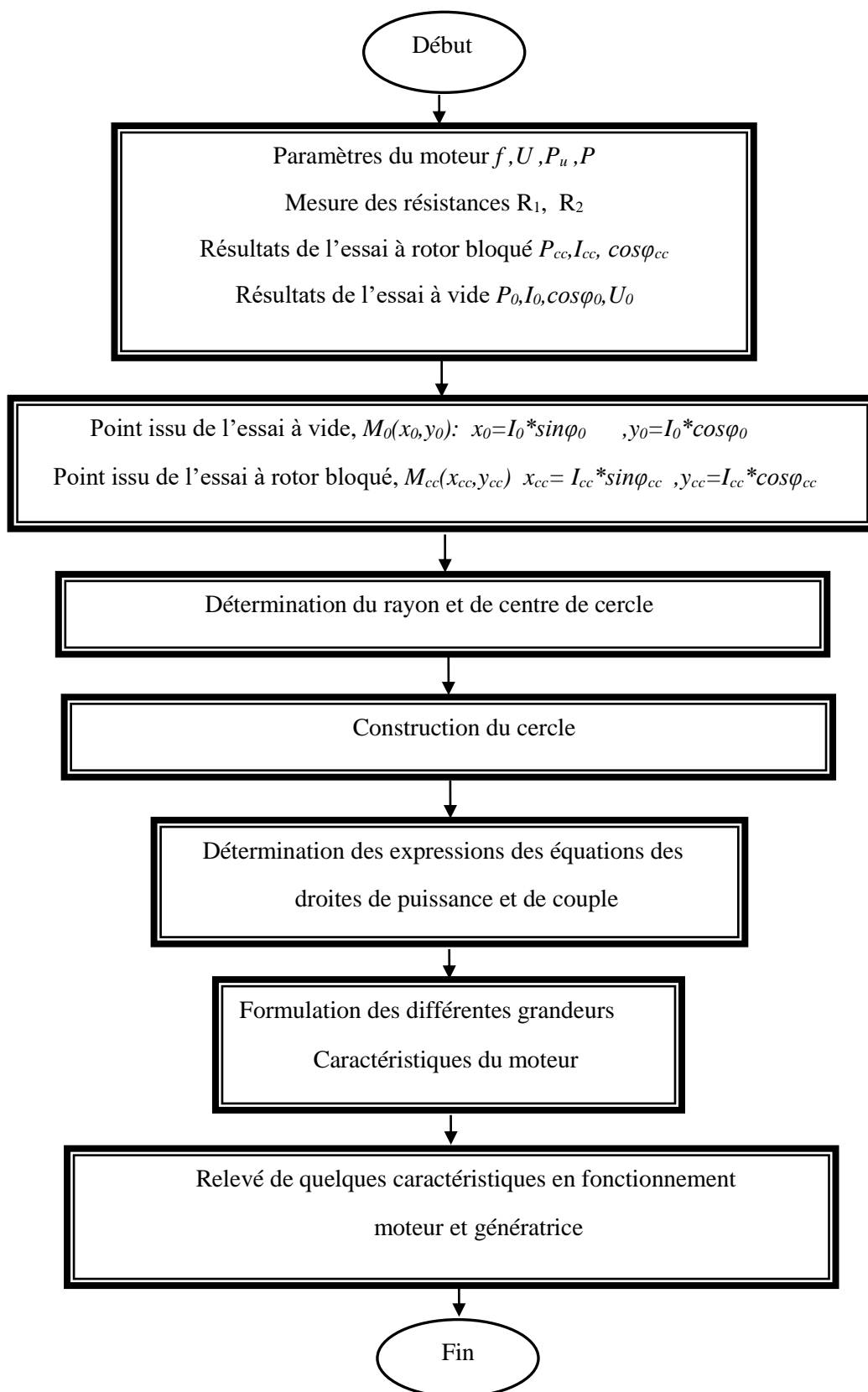


Fig.III.5 Organigramme du programme Matlab.

### III .5 Construction de diagramme circulaire en utilisant un programme

#### Matlab :

A partir des trois points des essais à vide, à rotor bloqué, du point nominal et de l'équation du cercle on formule un système d'équations à trois inconnues et on le résoudre pour déterminer les coordonnées du centre et le rayon du cercle.

#### a) Représentation du diagramme de cercle en fonctionnement moteur

En fonctionnement moteur le diagramme de cercle est représenté par (Fig.III.6).

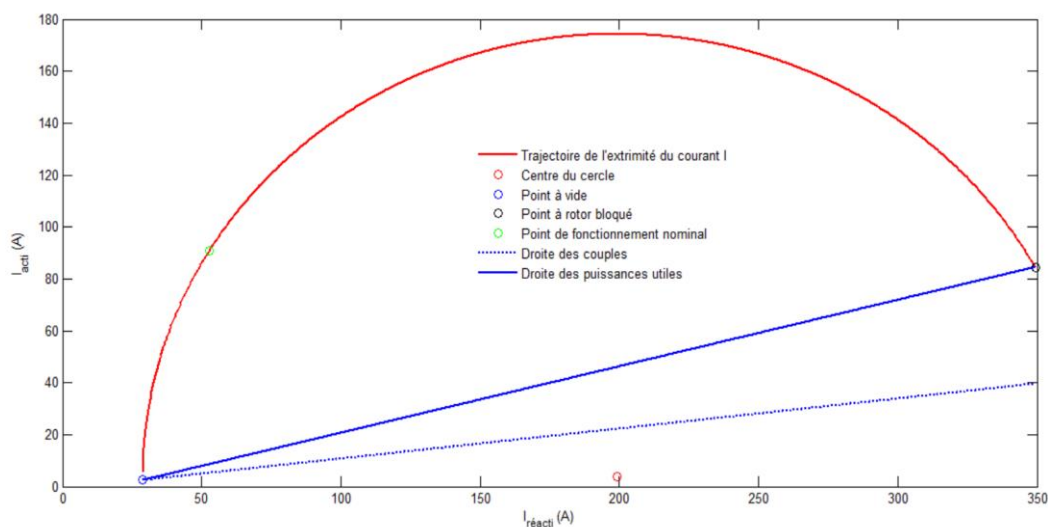


Fig.III.6 Diagramme de cercle issu des essais à vide et à rotor bloqué du moteur asynchrone.

La partie entière positive de cercle est représenté par (Fig.III.7).

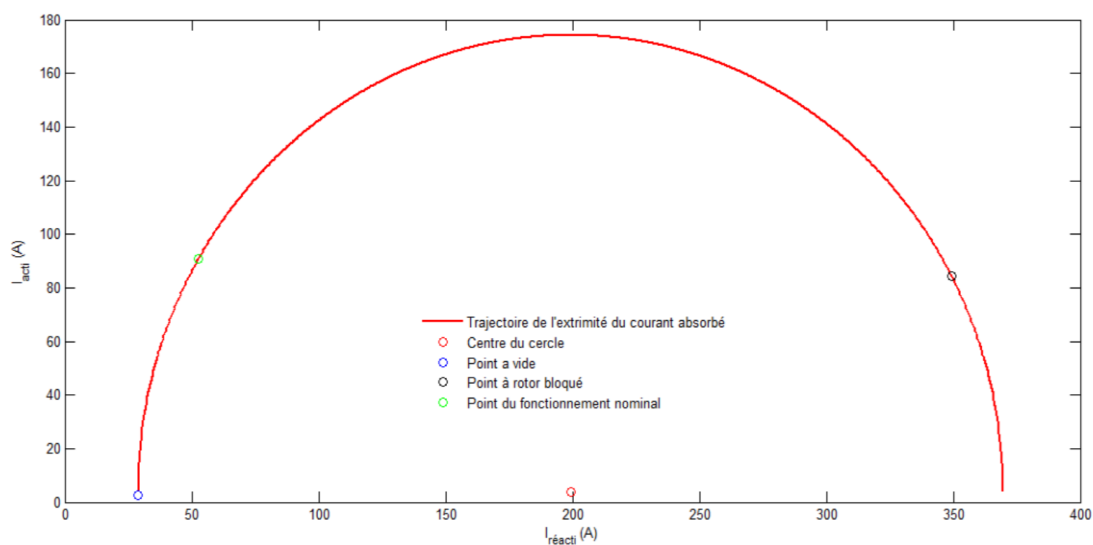
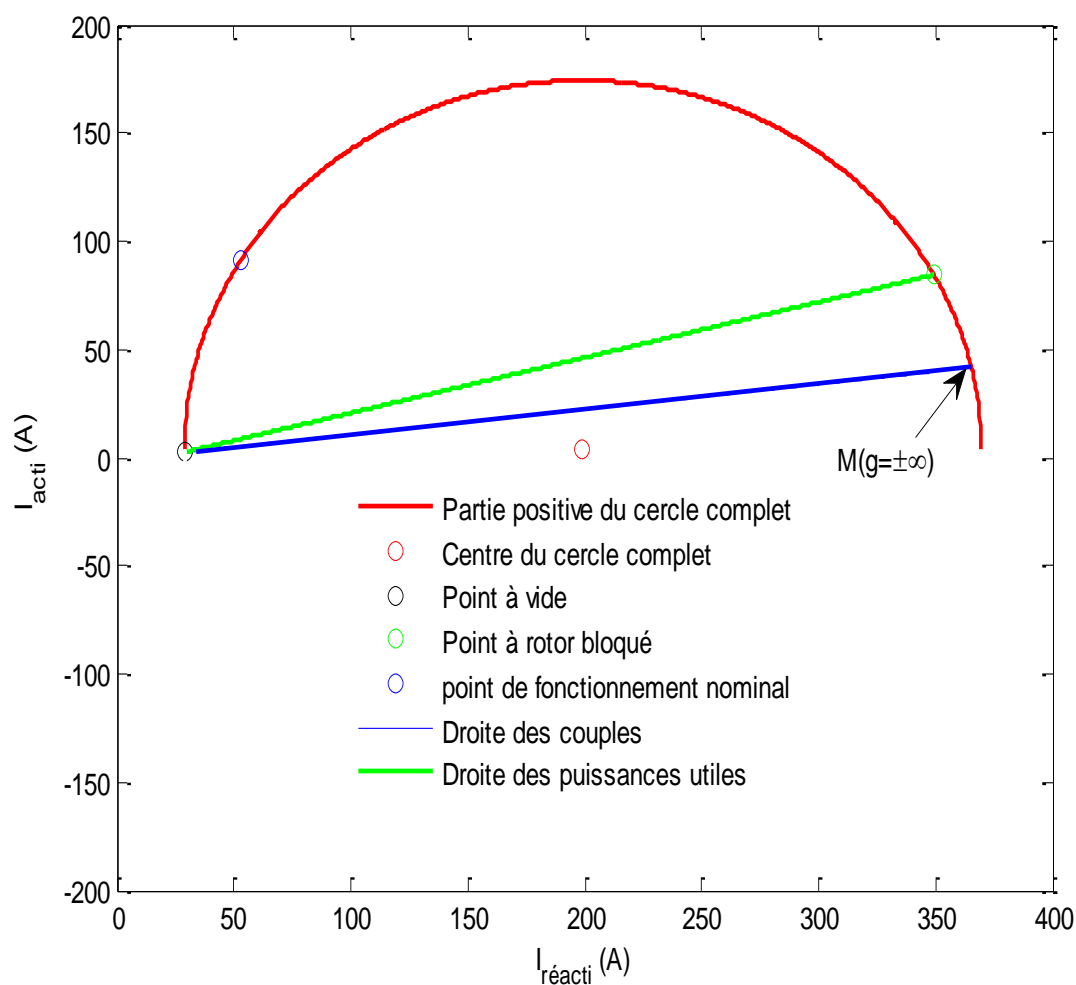


Fig.III.7 Partie entière positive de cercle.

**b) Extension du cercle aux lieux de fonctionnement en frein :**

Le point à glissement infini  $M (g = \infty)$  ce point est purement théorique car si le rotor tournait en sens inverse du champ tournant statorique à une vitesse infinie les pertes mécaniques et les pertes dans le fer rotorique seraient infinies.



**Fig.III.8 localisation de point  $M (g = \infty)$  sur le diagramme de cercle.**

**c) Extension du cercle aux lieux de fonctionnement en génératrice :**

Comme la courbe  $C=f(g)$  est symétrique par rapport à l'origine, donc en allant de  $M_0$  dans le sens contraire du sens trigonométrique la partie restante du cercle est symétrique de la partie précédente. La représentation du cercle complet est illustrée par (Fig.III.9)

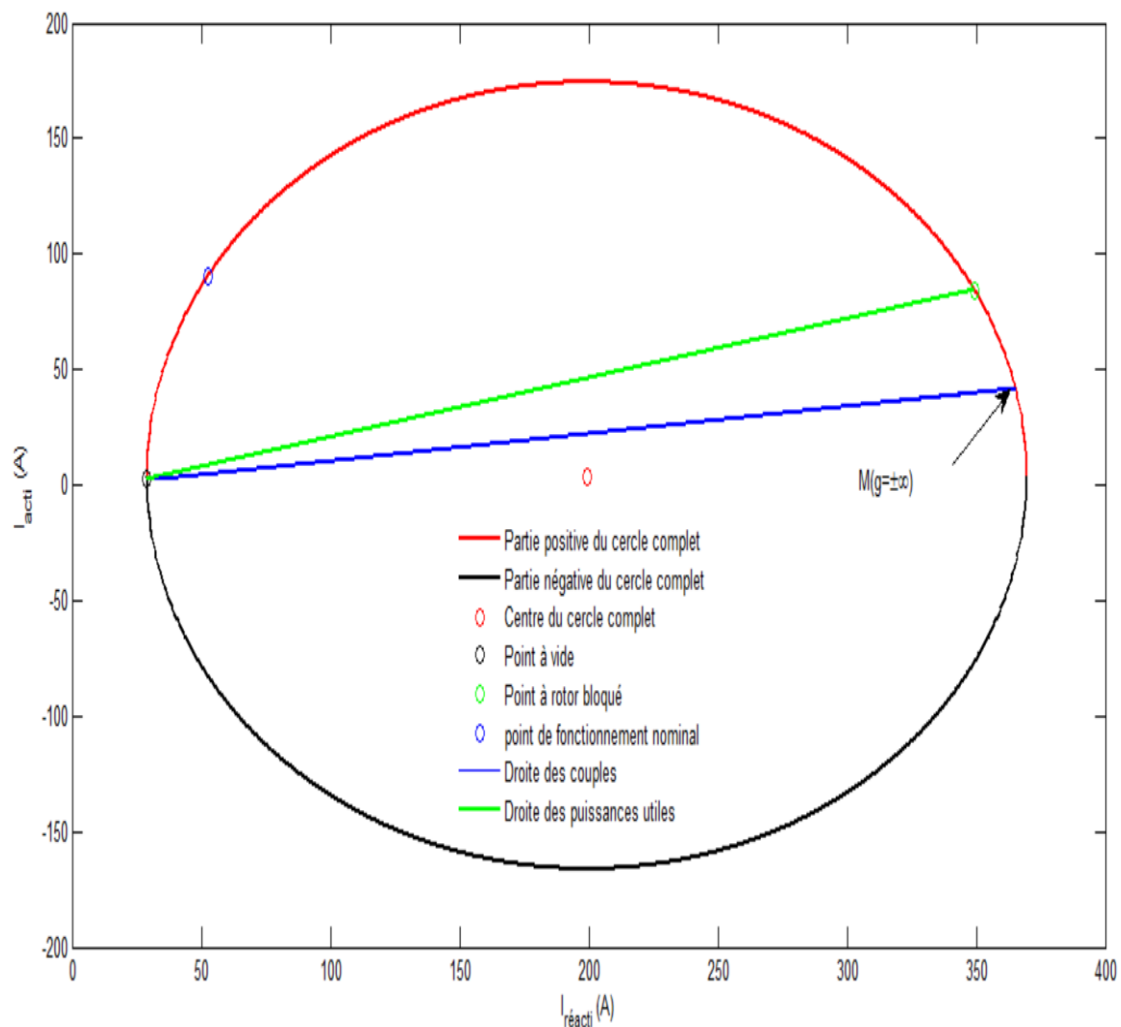


Fig.III.9 Diagramme de cercle complet.

### III .6 Relevé des caractéristiques en fonctionnement moteur :

#### a) Relevé du courant absorbé en fonction de la puissance utile :

La (Fig.III.10) représente le courant absorbé par un moteur asynchrone en fonction de la puissance utile. Nous avons remarqué que le courant part d'une valeur non nulle à cause du courant de la branche magnétisante, après il augmente jusqu'à la puissance utile maximale.

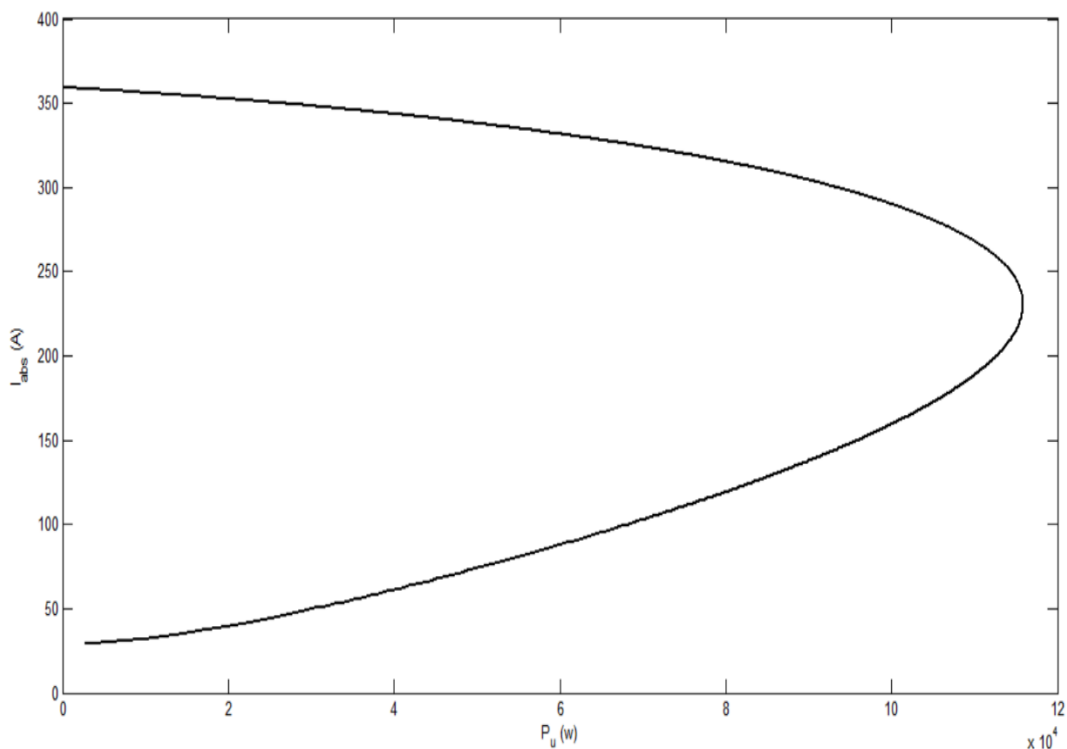


Fig.III.10 Variation du courant absorbé en fonction de la puissance utile.

b) Relevé du courant en fonction du glissement :

De même, le courant absorbé peut être représenté en fonction du glissement. La (Fig.III.11). montre bien que le courant croît avec la diminution de la vitesse (augmentation du glissement).

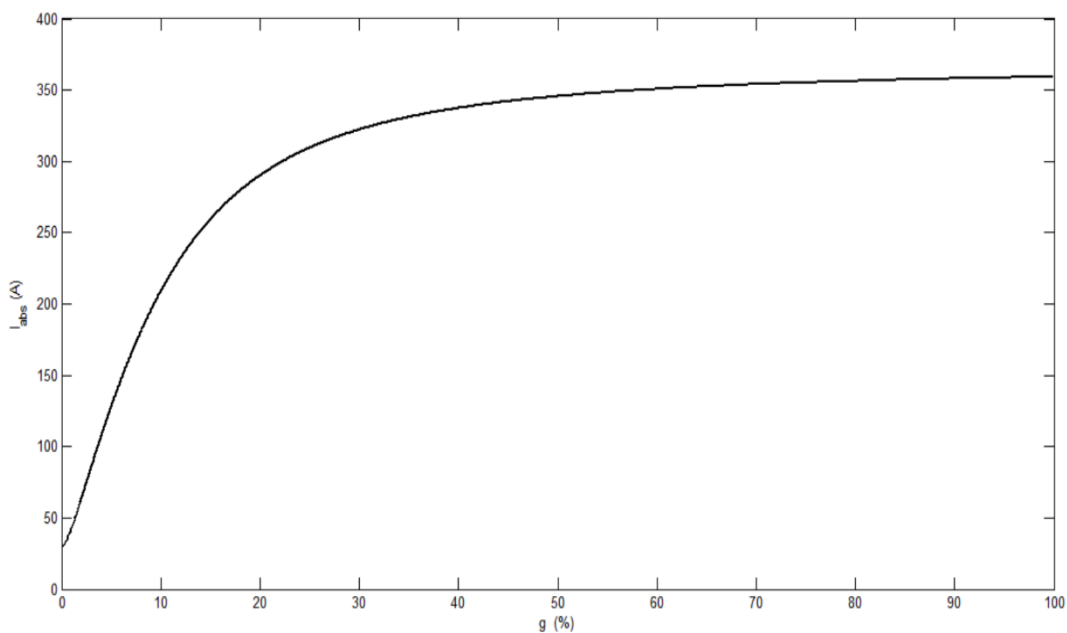
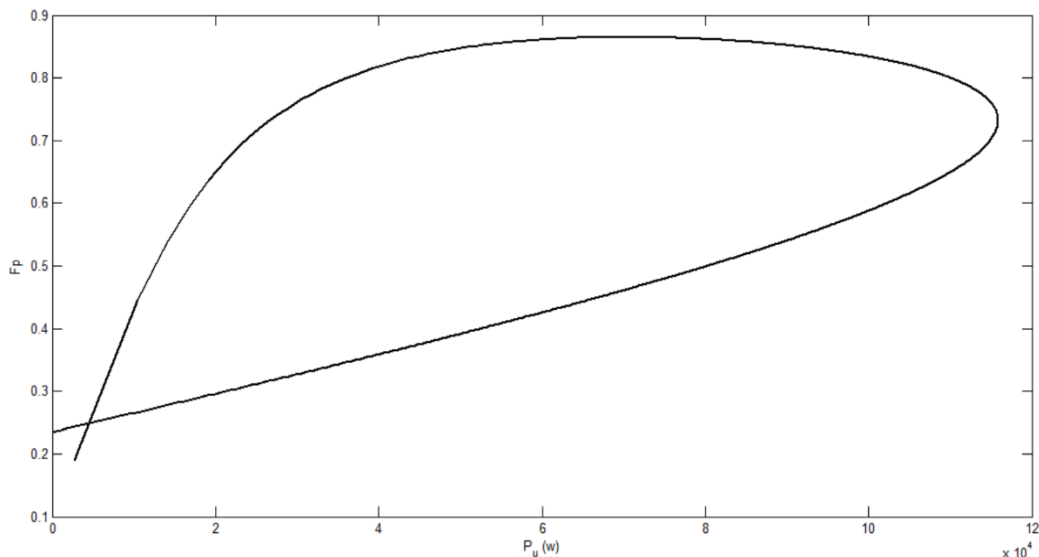


Fig.III.11 Variation du courant absorbé en fonction de glissement.

**c) Relevé du facteur de puissance en fonction de la puissance utile :**

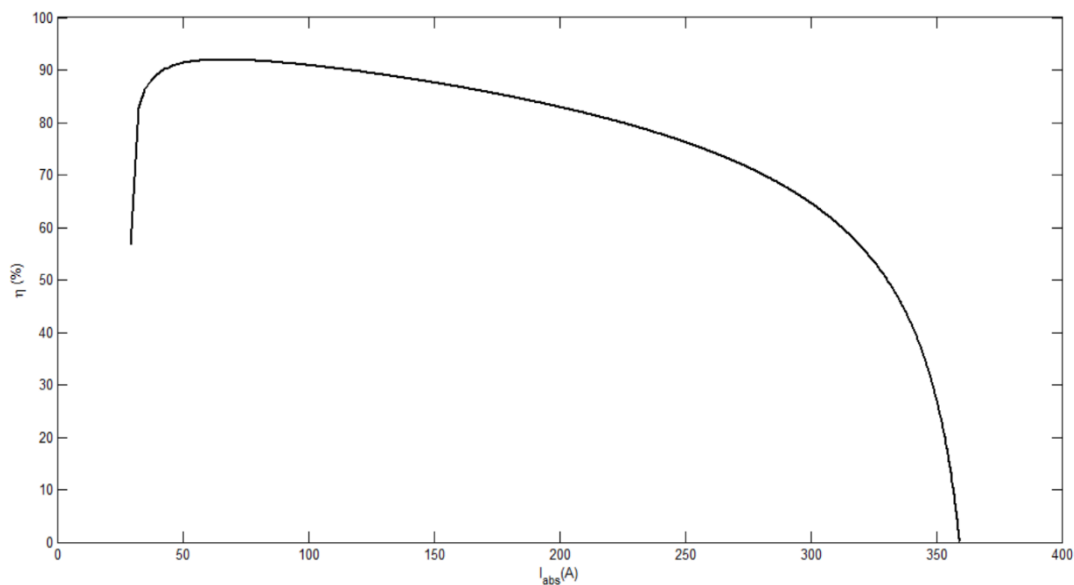
La (Fig.III.12) représente la variation du facteur de puissance en fonction de la puissance utile, à vide, le facteur de puissance est faible. Il augmente rapidement avec l'augmentation de la puissance.



**Fig.III.12** Variation du facteur de puissance en fonction de la puissance utile.

**d) Relevé de rendement en fonction du courant absorbé :**

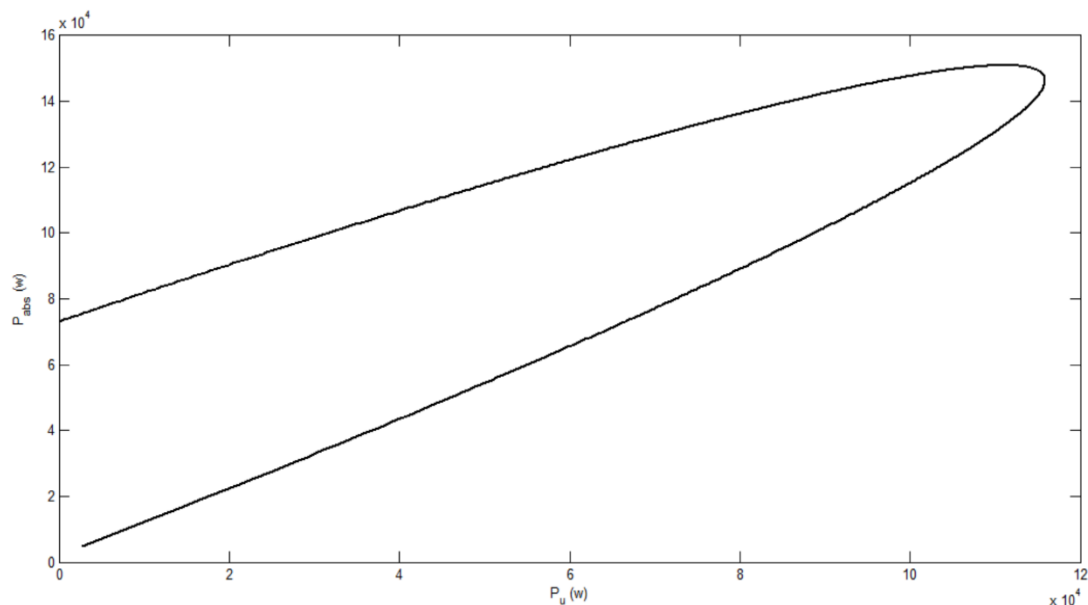
La Figure (III.13) représente la variation de rendement en fonction du courant absorbé. On remarque que plus la valeur du courant absorbé est grande, plus la valeur du rendement est faible.



**Fig.III.13** Variation du rendement en fonction du courant absorbé.

**e) Relevé de puissance absorbé en fonction de la puissance utile :**

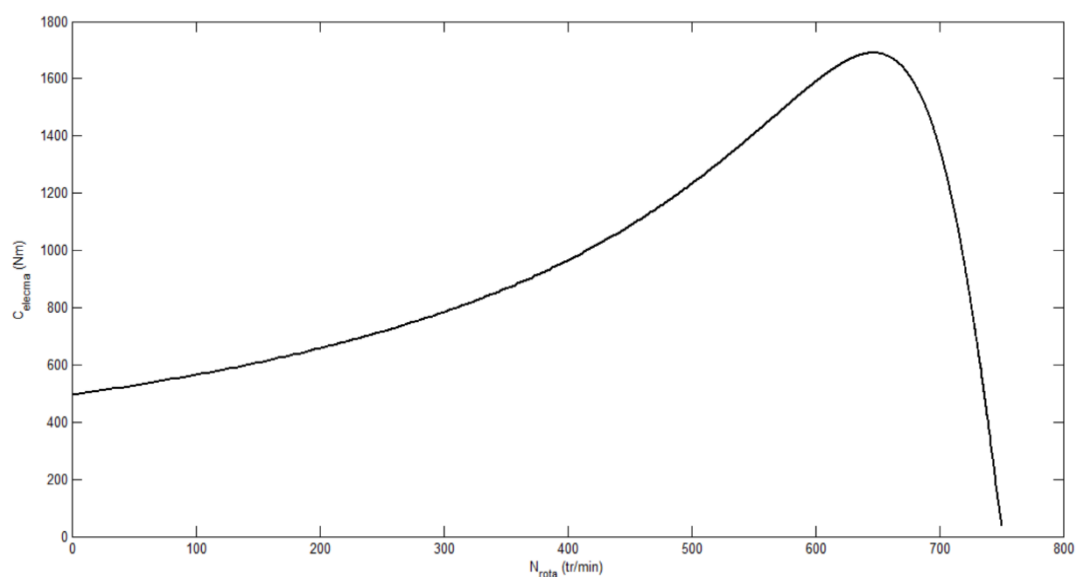
La (Fig.III.14) représente la variation de la puissance absorbée en fonction de la puissance utile. Nous remarquons que la puissance absorbée augmente proportionnellement en fonction de la puissance utile, surtout proche de la zone de fonctionnement nominale.



**Fig.III.14 Variation de puissance absorbée en fonction de la puissance utile.**

**f) Relevé du couple électromagnétique en fonction de la vitesse :**

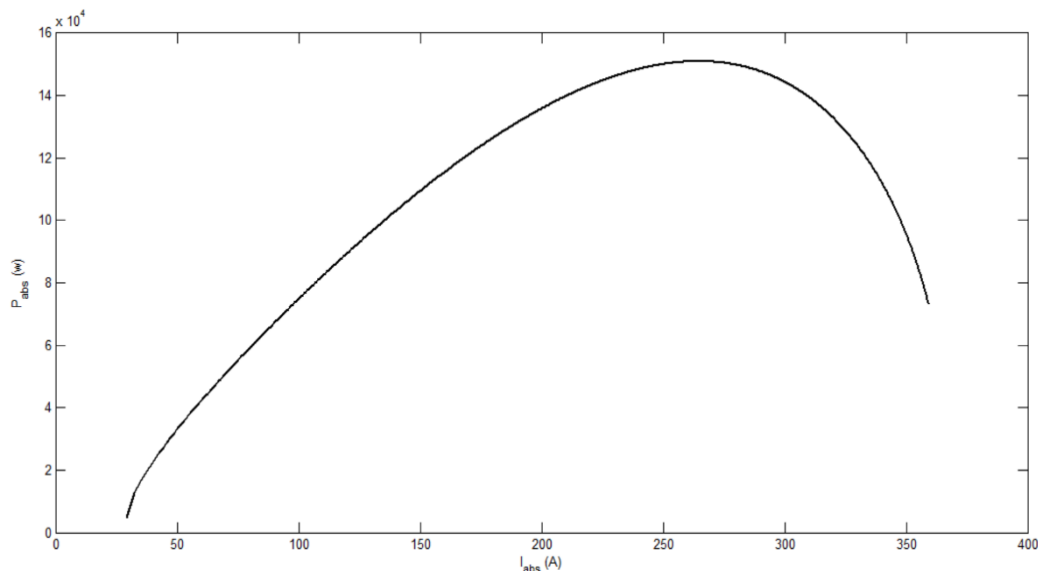
La (Fig.III.15) représente la variation du couple électromagnétique en fonction de la vitesse. Nous remarquons que le couple démarre d'une valeur non nulle (couple de démarrage) il augmente jusqu'à le rotor prend sa vitesse de synchronisme après il va diminuer.



**Fig.III.15 Variation du couple électromagnétique en fonction de la vitesse.**

**g) Relevé de la puissance absorbée en fonction du courant absorbé :**

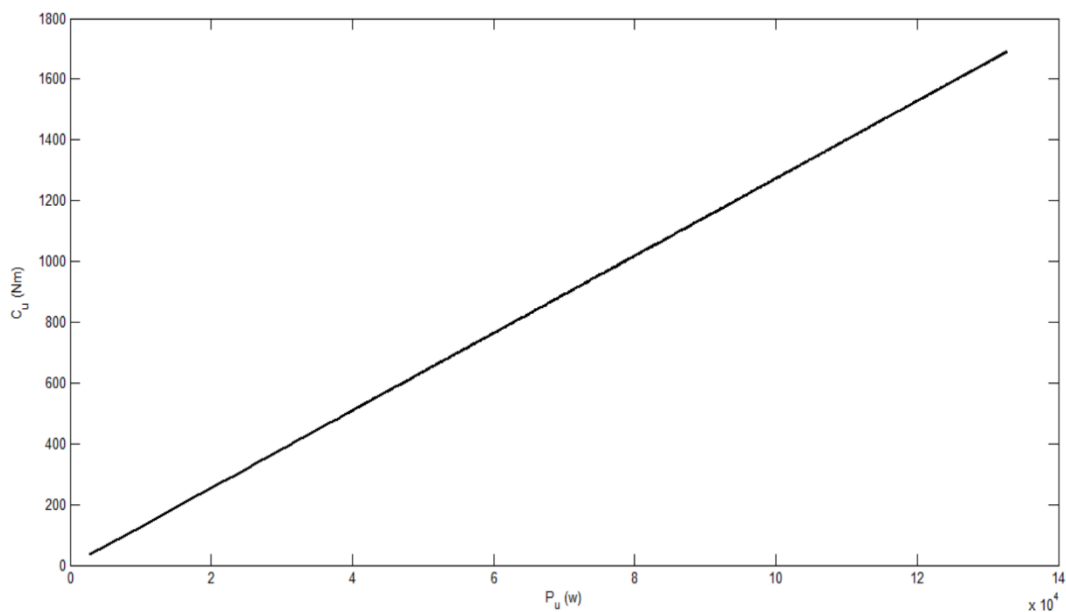
La (Fig.III.16) représente la variation de la puissance absorbée en fonction du courant absorbé. Nous remarquons qu'à mesure que la valeur du courant absorbé augmente, la valeur de la puissance absorbée augmente jusqu'à diminuer aux valeurs maximales du courant.



**Fig.III.16** Variation de la puissance absorbée en fonction du courant absorbé.

**h) Relevé du couple utile en fonction de la puissance utile :**

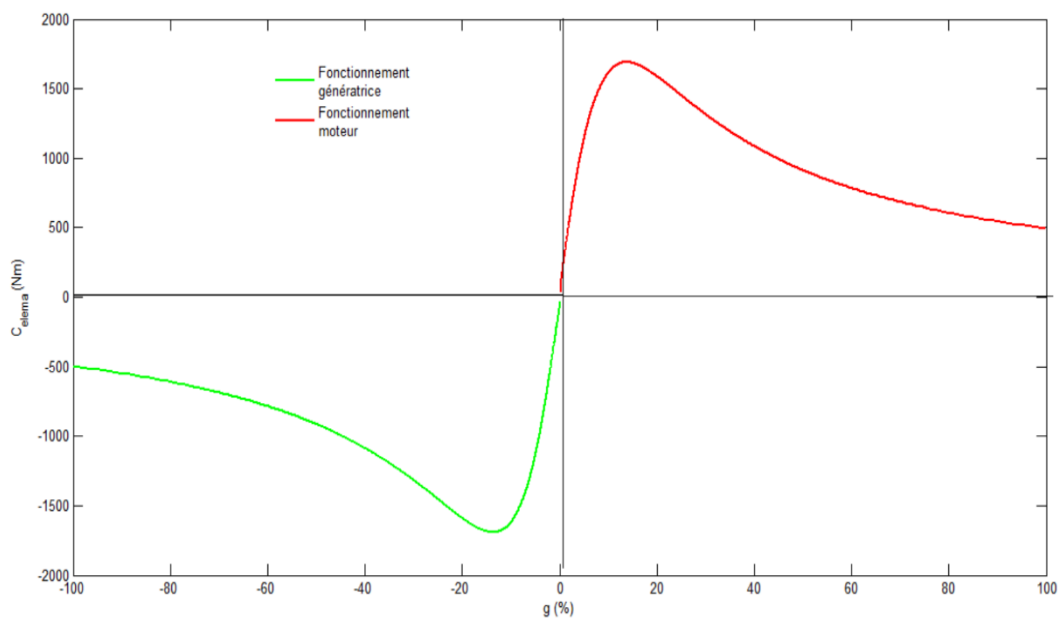
La (Fig.III.17) représente la variation du couple utile en fonction de la puissance utile. Nous remarquons que le couple utile croît linéairement avec la puissance utile.



**Fig.III.17** Variation du couple utile en fonction de la puissance utile.

**i) Relevé de la caractéristique mécanique lors de fonctionnement en moteur et en génératrice :**

La Caractéristique mécanique généralisant le fonctionnement moteur et génératrice est représentée par (Fig.III.18). C'est une courbe symétrique par rapport à l'origine.

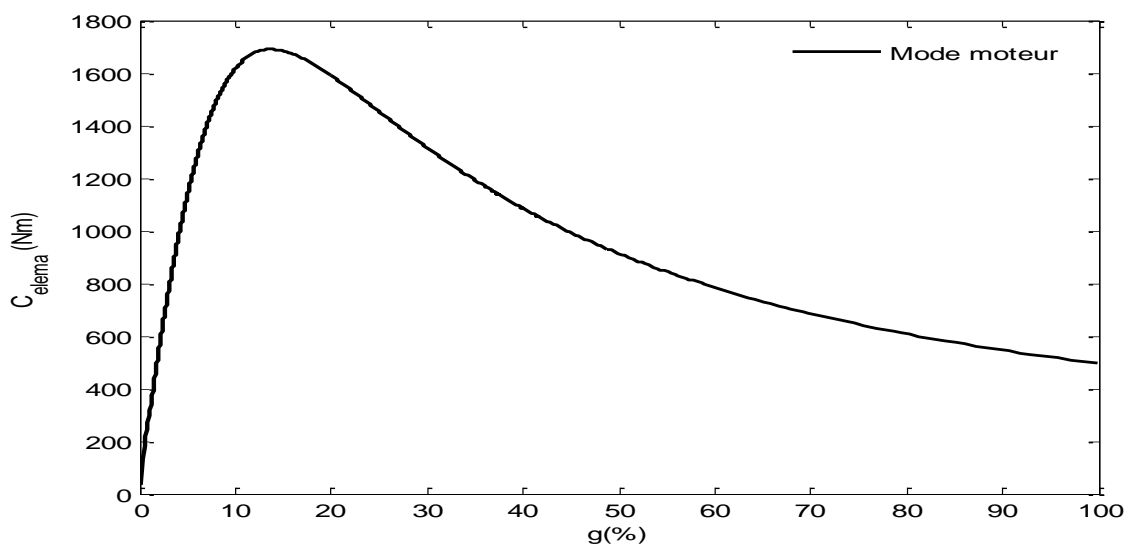


**Fi**

**g.III.18** Caractéristique mécanique généralisant le fonctionnement moteur et génératrice.

**j) Relevé du couple électromagnétique en fonction de glissement :**

La représentation de la caractéristique mécanique  $C = f(g)$  du moteur est donnée par (Fig.III.19).



**Fig.III.19** Variation du couple électromagnétique en fonction de glissement.

### **III .7 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les formes de l'équation du cercle. En suite et en utilisant l'hypothèse de Kapp nous avons démontré que les extrémités du courant absorbé décrit un cercle lorsque la charge ou le glissement varie. La représentation graphique de ce cercle peut être réalisée en utilisant les résultats des essais à vide, à rotor bloqué. Nous avons exploité cercle pour en tirer les caractéristiques au point nominal. Nous avons procédé en se basant sur les résultats des essais cités ci-dessous à élaborer un programme Matlab pour simuler et relevé quelques caractéristiques en fonctionnement moteur ainsi que la caractéristique mécanique généralisant le fonctionnement moteur et génératrice.

## *Conclusion générale*

---

## **CONCLUSION GÉNÉRALE:**

La méthode du diagramme de cercle ou circulaire est basée sur la représentation de la variation de la composante active en fonction de composante réactif du courant absorbé. Cette représentation est un cercle qui détermine les lieux de l'extrémité de ce courant lors de la variation de la charge (ou glissement).

La méthode de diagramme circulaire est d'une grande importance pour l'étude généralisé de la machine asynchrone en particulier en fonctionnement moteur et génératrice. Elle permet de prédéterminer toutes les caractéristiques de fonctionnement en particulier la caractéristique mécanique pour les différents régimes avec un minimum d'énergie. L'avantage aussi de cette méthode est sa simplicité et sa rapidité. Nous avons essayé de généraliser cette méthode dans le cas de la machine asynchrone. Nous avons procédé à relever quelques caractéristiques en fonctionnement moteur sans oublier celle de la caractéristique mécanique en mode génératrice. Ce travail nécessite quand même une extension au cas des moteurs de puissance inférieur à 15kw et aux moteurs à rotor à cage d'écureuil.

## *Bibliographie*

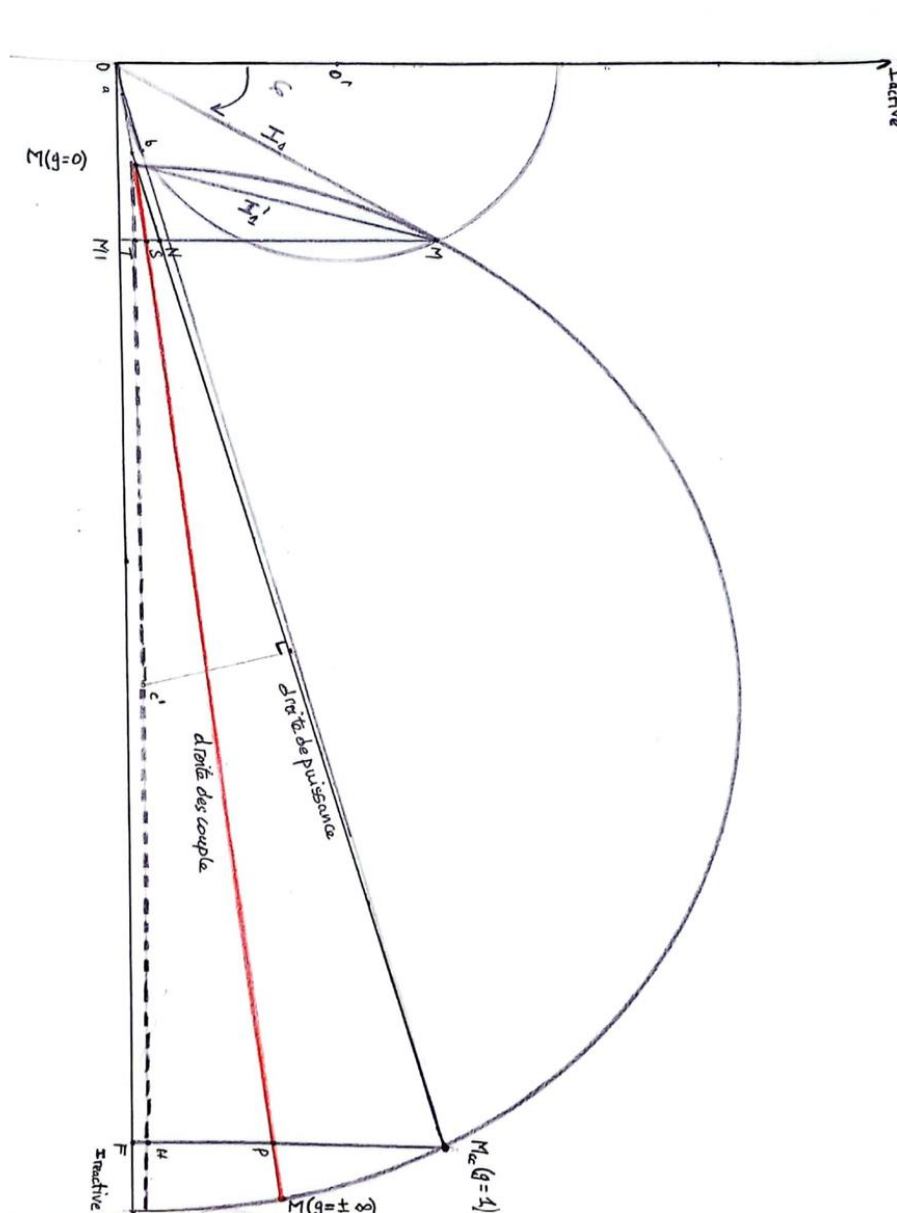
---

- [1] BELAIDI Mehdi , CHAKER Yacine, ” La Modélisation de la machine asynchrone en vue de sa commande”, Mémoire de Licence, Université Badji Mokhtar - Annaba ,2022.
- [2] GAHMOUCHE Abdelhak, ” Diagnostic de la machine asynchrone par mesure de champ Magnétique de dispersion”, Mémoire de master. Université MOHAMED KHIDER Biskra,2019.
- [3] LAKROUN Ahmed , MOULOUD Slimane , “Identification Des Paramètres D’une Machine Asynchrone”, Mémoire de master. Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2018
- [4] BENFEDA Rachid ,AMRANE Boussad ,CHAOUICHE Aziz, “Etude de la protection électrique des moteurs asynchrones triphasés”, Mémoire de master. Université MOULOUD MAMMERI Tizi-Ouzou,2012.
- [5] KOUADRI Ismail , AZIEZ Bachir, ” Etude de maintenance d'un moteur asynchrone triphasé”, Mémoire de master. Université de Ghardaïa,2022.
- [6] DAOUDI Ines, “Commande d’un Moteur Asynchrone Triphasé par un Capteur et Variateur”, Mémoire de master. Université BADJI MOKHTAR Annaba,2021.
- [7] AOUED Ahmed , BOUNOUA Ahmed, “Commande d’un moteur asynchrone pour un processus industriel”, Mémoire de master. Université IBEN KHALDOUN Tiaret,2022.
- [8] LOUNI Amar ,ALLOUCHENE Madjid, “Identification Des Parametres Eléctriques De La Machine Asynchrone à Cage d’Ecureuil “, Université MOULOUD MAMMERI Tizi-Ouzou,2012.
- [9] KHALDI Merwane ,BOUAICHAOUI Ibrahim, “Modélisation et analyse fréquentielle dans les enroulements d’un transformateur triphasé en régime MF : application d’ABC”, Mémoire de master. Université DR. YAHIA FARES Medea,2021.
- [10] ANDRE Fouillé. TOME 2 : “Machines électriques, Problèmes d’électrotechnique à l’usage des ingénieurs”, Dunod,1978.
- [11] Théodore WILDI ,Gilbert SYBILLE ,”ELECTROTECHNIQUE “,4<sup>e</sup> édition,2005
- [12] Gregory peset, “nouvelle approche pour la predetermination des caracteristiques externes des generatrices asynchrones fonctionnant dans le cadre de l’ilotage “, universite du quebec, mars ,2003.

## *Annexes*

---

## Annexe 1:



**Figure A1 :** Diagramme de cercle de la machine asynchrone en fonctionnement moteur.

Annexe 2:

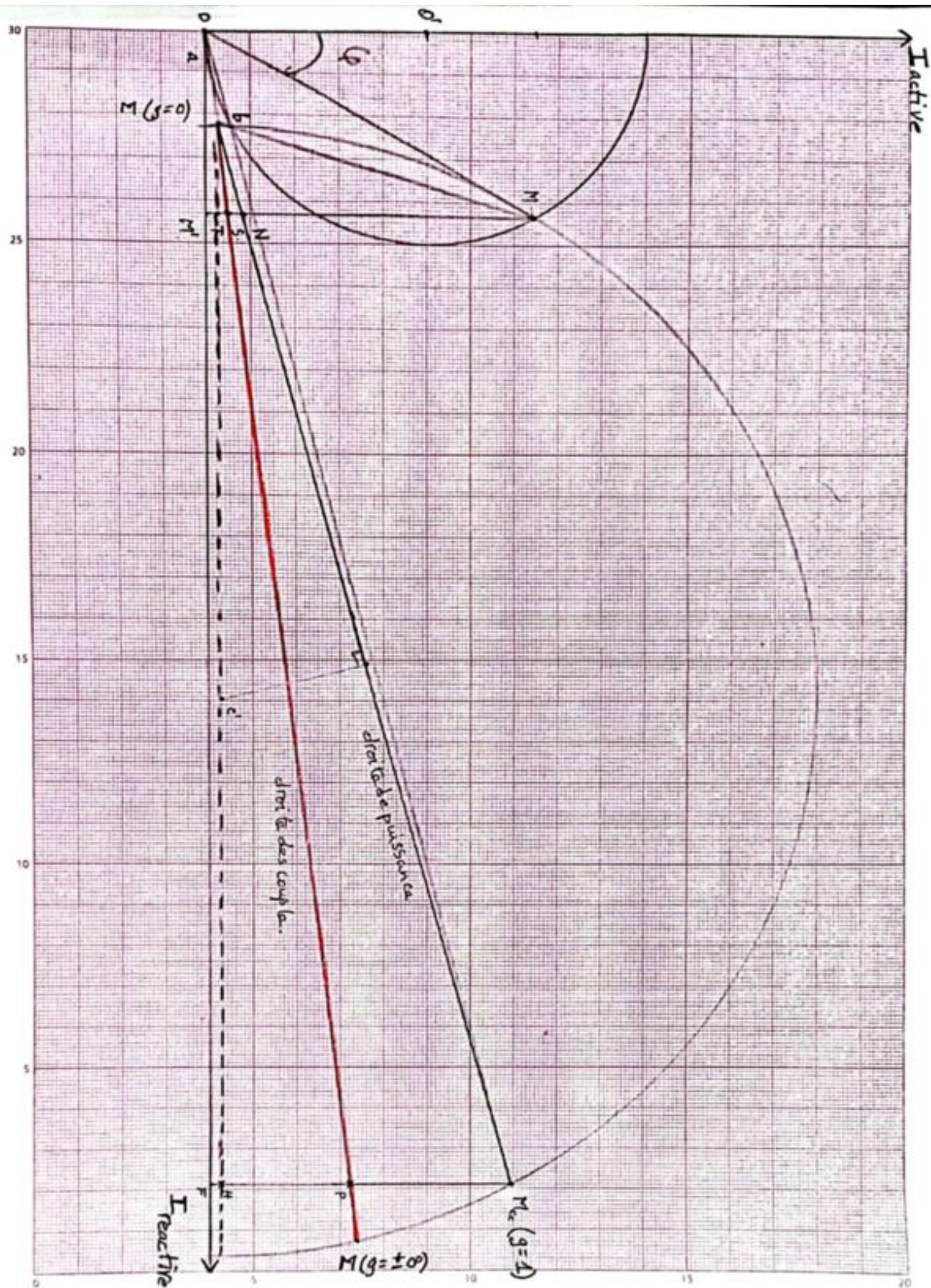


Figure A2 : Diagramme de cercle de la machine asynchrone en fonctionnement moteur.