

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

UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTÉ DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

## Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Électrotechnique**

Spécialité : **ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

*Présenté par*

**ABDENOUR LAZIZI  
NACIM MOHAMMEDI**

Thème

## **Calcul et mesure des pertes d'un moteur asynchrone avec coupure d'une phase d'alimentation**

*Mémoire soutenu publiquement le 27/06/2024 devant le jury composé de :*

**Mr Youcef BOUTORA**  
Professeur, UMMTO, Président

**Mr Rabah KHALDI**  
MAA, UMMTO, Encadreur

**Mr Azzouz MIOUAT**  
MAA, UMMTO, Examineur

# Remerciements

*Tout d'abord on remercie Allah de tout mon cœur de nous avoir donné le Courage et la patience qui ont permis d'accomplir ce modeste travail.*

*On veut adresser le grand remerciement le plus sincère à notre encadreur "Mr KHALDI RABAH" qui a suggéré le thème de ce mémoire, Pour sa bonne volonté d'accepter de nous encadrer, pour tout le temps qu'il nous a octroyé et pour tous les conseils qu'il nous a prodigué.*

*Nos profondes gratitudes aux membres du jury qui ont fait l'honneur d'évaluer ce travail de fin d'études.*

*Tous nos infinis remerciements vont à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant notre cursus universitaire.*

*Nos remerciements les plus chaleureux vont à nos chers parents pour leurs encouragements, leur patience et leur grand soutien durant toutes ces années d'études.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce Mémoire.*

# Dédicaces

*Nous offrons cet humble travail avec un cœur plein de joie: A ceux qui nous ont été source d'inspiration et de volonté Nos très chers pères et Nos très chères mères pour leurs sacrifices et encouragements durant toute la période de nos études.*

*A tous nos frères et sœurs. Et à tous les amis et tous ceux qui nous ont soutenu dans cette réussite.*

*LAZIZI / MOHAMMEDI*

# SOMMAIRE

Remerciement

Dédicaces

Listes des figures

Listes des tableaux

Notation et Symboles

Introduction générale .....1

## Chapitre I Généralités, pertes et défauts d'un moteur asynchrone

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>4</b>
I.2. Généralités sur la machine asynchrone.....	4
I.2.1. Définition et représentation du moteur asynchrone.....	4
I.3. Constitution d'un moteur asynchrone.....	5
I.3.1. Le stator.....	6
I.3.2. Le rotor.....	6
I.4 Principe et caractéristiques de fonctionnement.....	8
I.4.1. La vitesse de synchronisme.....	8
I.4.2. Le champ tournant.....	8
I.4.3. Le glissement.....	9
I.4.4. Le couple.....	9
I.5. Bilan de puissance et des pertes.....	9
I.5.1. Les différentes puissances de la machine asynchrone.....	10
I.5.2. Les différentes pertes de la machine asynchrone.....	12
I.5.2.a. Pertes dans le circuit électrique.....	12
I.5.2.b. Pertes dans le circuit magnétique.....	13
I.5.2.c. Pertes mécaniques.....	14
I.5.2.d. Pertes supplémentaires.....	15

I.6. Les différents défauts de la machine asynchrone.....	17
I.6.1. Défauts du au réseau d'alimentation.....	17
I.6.2. Défauts d'ordre électrique.....	17
I.6.3. Défauts d'ordre mécanique.....	19
I.7. Les causes des défauts.....	20
I.8. Les conséquences des défauts.....	21
<b>I.9. Conclusion.....</b>	<b>21</b>

## **Chapitre II : Estimation des paramètres électriques et performances d'un moteur asynchrone**

<b>II.1 Introduction.....</b>	<b>23</b>
II.2 Schéma électrique équivalent de la MAS.....	23
II.3 Détermination des paramètres électriques.....	24
II.3.1 Méthode des essais classiques.....	24
II.3.2. Le schéma électrique équivalent en T.....	24
II.4. Essai en courant continu.....	25
II.4.1. Détermination de la résistance statorique $R_s$ .....	25
II.5. Essai à vide en mode sain.....	26
II.6. Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques.....	27
II.7. Détermination de la résistance $R_m$ et de la réactance $X_m$ .....	29
II.8. Essai à rotor bloqué.....	30
II.9. Résultats de la Méthode classique.....	32
II.10. Méthode itérative.....	32
II.11. Résultat de la Méthode itérative.....	37
II.12. Méthode théorique des performances.....	37
<b>II.13. Conclusion.....</b>	<b>40</b>

# Chapitre III : Estimation des pertes d'un moteur asynchrone avec un défaut de coupure d'une phase d'alimentation

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>42</b>
III.2 Présentation du moteur étudié.....	42
III.3 Description du banc d'essai.....	42
III.4 Essai en charge.....	43
III.5 Manipulation.....	43
III.6 Résultats de mesure de l'essai en charge.....	44
III.7 Validation des paramètres du schéma équivalent en T.....	44
III.7.1 Présentation des caractéristiques de fonctionnement de la machine, méthode classique, méthode itérative et expérimentale.....	44
III.7.2 Discussion des résultats.....	49
III.9 Pertes d'un moteur asynchrone en présence d'un défaut de coupure d'une phase.....	49
III.10 Calcul de la variation des courants de défaut par rapport aux courants du mode sain.....	50
III.11 Essai à vide avec défaut.....	51
III.11.1 Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques avec défaut.....	53
III.12 Résultats de simulation et comparaison.....	54
III.13 Observations et commentaires.....	56
III.14 Conclusion.....	65
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>66</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>67</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>68</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>70</b>

# Liste des figures

## Chapitre I :

<b>Figure I.1 :</b> Machine asynchrone.....	4
<b>Figure I.2 :</b> Symbole du moteur asynchrone.....	5
<b>Figure I.3 :</b> Vue éclatée d'un moteur asynchrone.....	5
<b>Figure I.4:</b> Stator d'une machine asynchrone.....	6
<b>Figure I.5 :</b> Schéma du rotor à cage d'écureuil.....	7
<b>Figure I.6:</b> Schéma d'un rotor bobiné.....	7
<b>Figure I.7 :</b> Schéma de principe de fonctionnement du moteur asynchrone.....	8
<b>Figure I.8 :</b> Répartition des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone à cage.....	10
<b>Figure I.9 :</b> Circulation des courants de Foucault dans une plaque métallique.....	14
<b>Figure I.10 :</b> Représentation des différents défauts statoriques.....	18
<b>Figure I.11 :</b> Roulement à billes.....	19
<b>Figure I.12 :</b> Types d'excentricité : statique, dynamique, mixte.....	20

## Chapitre II :

<b>Figure II.1 :</b> Schéma équivalent ramené au stator de la machine asynchrone.....	23
<b>Figure II.2 :</b> Schéma de mesure de la résistance statorique en continu.....	25
<b>Figure II.3 :</b> Le modèle de la machine asynchrone à vide.....	26
<b>Figure II.4 :</b> Circuit de mesure de l'essai à vide.....	27
<b>Figure II.5 :</b> Courbe des pertes fer statorique et des pertes mécaniques à vide.....	28
<b>Figure II.6 :</b> Circuit de mesure de l'essai à rotor bloqué.....	30
<b>Figure II.7 :</b> Schéma équivalent simplifié de la machine asynchrone à rotor bloqué.....	30
<b>Figure II.8 :</b> Présentation trigonométrique de l'impédance $Z_e$ .....	39

## Chapitre III :

<b>Figure III.1 :</b> Dispositif Expérimental utilisé.....	43
<b>Figure III.2 :</b> Circuit de mesure de l'essai en charge.....	44
<b>Figure III.3 :</b> Evolution des Pertes Joule statorique et rotorique sans défauts en fonction du glissement.....	46
<b>Figure III.4 :</b> Evolution de la vitesse de rotation en fonction du couple utile.....	46
<b>Figure III.5 :</b> Evolution du courant absorbé en fonction du glissement.....	47
<b>Figure III.6 :</b> Evolution de la puissance absorbée en fonction du glissement.....	47
<b>Figure III.7 :</b> Allure de la puissance utile en fonction du glissement.....	48
<b>Figure III.8 :</b> Evolution du facteur de puissance en fonction du glissement.....	48
<b>Figure III.9 :</b> Evolution du rendement en fonction de glissement.....	49
<b>Figure III.10 :</b> Evolution du couple utile en fonction de glissement.....	49
<b>Figure III.11 :</b> Evolution de la puissance électromagnétique en fonction du glissement.....	50
<b>Figure III.12 :</b> schémas du défaut de coupure d'une phase.....	51
<b>Figure III.13 :</b> Courbe des pertes fer et des pertes mécaniques à vide avec défaut.....	53
<b>Figure III.14 :</b> Evolution de Courant Composé pratique et théorique avec et sans défaut.....	54
<b>Figure III.15 :</b> Evolution de Courant Simple pratique et théorique avec et sans défaut.....	55

<b>Figure III.16</b> : Evolution des Pertes Joule statoriques totale pratiques et théorique avec et sans défaut.....	55
<b>Figure III.17</b> : Evolution des pertes joule statorique dans une seule phase pratiques et théoriques avec et sans défaut.....	56
<b>Figure III.18</b> : Evolution des courants rotoriques théoriques avec et sans défaut.....	57
<b>Figure III.19</b> : Evolution des Pertes Joule rotorique dans une phase théoriques avec et sans défaut.....	57
<b>Figure III.20</b> : Evolution des Pertes Joule rotorique totales théoriques et pratiques avec et sans défaut.....	58
<b>Figure III.21</b> : Evolution des courants magnétisants théoriques avec et san défaut.....	59
<b>Figure III.22</b> : Evolution des courants actifs de la branche de magnétisation théoriques avec et sans défaut.....	59
<b>Figure III.23</b> : Evolution des pertes fer pratiques et théoriques avec et sans défaut.....	60
<b>Figure III. 24</b> : Evolution des pertes fer dans une seule phase théoriques avec et sans défaut.....	60
<b>Figure III.25</b> : Evolution des puissances absorbées théoriques et pratiques sans et avec défaut.....	61
<b>Figure III.26</b> : Evolution des rendements théoriques et pratique sans et avec défaut.....	62
<b>Figure III.27</b> : Evolution de Facteur de puissance théoriques et pratique sans et avec défaut.....	62
<b>Figure III.28</b> : Evolution de la Puissance utile théorique et pratique sans et avec défaut...	63
<b>Figure III.29</b> : Evolution de Couple utile théorique et pratique sans et avec défaut.....	63
<b>Figure III.30</b> : Evolution de la Puissance transmise théorique et pratique sans et avec défaut.....	64
<b>Figure III.31</b> : Evolution de la vitesse de rotation en fonction de couple utile théoriques et pratique sans et avec défaut.....	64

# Liste des tableaux

## Chapitre II :

<b>Tableau II.1</b> : Résultats de mesure de l'essai en courant continu .....	26
<b>Tableau II.2</b> : Résultats de mesure de l'essai à vide en mode sain.....	27
<b>Tableau II.3</b> : Résultats de mesure de l'essai à rotor bloqué.....	31
<b>Tableau II.4</b> : Les paramètres du schéma équivalent méthode classique.....	32
<b>Tableau II.5</b> : Les paramètres du schéma équivalent méthode itérative.....	37
<b>Tableau II.6</b> : Comparaison des deux méthodes.....	37

## Chapitre III :

<b>Tableau III.1</b> : Résultats de mesure de l'essai en charge .....	45
<b>Tableau III.2</b> : Courants à vide en mode sain et avec défaut.....	51
<b>Tableau III.3</b> : Résultats de mesure de l'essai à vide avec entrainement avec coupure de phase.....	52

# Notations et symboles

$U$  : Tension composée aux bornes du moteur [V].

$I$  : Intensité du courant de ligne en ampères [A].

$\cos\varphi$  : Facteur de puissance.

$P_{tr}$  : La puissance transmise à travers l'entrefer [W]

$P_{em}$  : La puissance électromagnétique [W]

$P_M$  : la puissance mécanique [W]

$P_{fr}$  : Pertes fer au rotor [W]

$P_m$  : Pertes mécaniques [W].

$C_u$  : Le couple utile [Nm]

$\eta$  : Le rendement

$N_s$  : vitesse de rotation de synchronisme (tr/min).

$N_r$  : vitesse de rotation du rotor (tr/min).

$\Omega_r$  : vitesse angulaire réelle de la machine (rd/s).

$\Omega_s$  : vitesse de synchronisme (rd/s).

$g$  : le glissement de la machine

$P$  : nombre de paire de pôles

$f$  : la fréquence du réseau en [Hz]

$f_r$  : fréquence rotorique de la machine [Hz]

$P_{hys}$  : pertes par hystérésis [W]

$K_h$  : coefficient des pertes par hystérésis

$B_{max}$  : Induction maximale dans l'entrefer [Tesla]

$P_F$  : Perte fer par courants de Foucault

$K_f$  : Coefficient caractéristique de la tôle.

$e$  : épaisseur de la tôle [m]

$D_{\text{ext}}$  : diamètre extérieur du stator [m].

$m_1$  : nombre de phase au stator

$I_s$  : le courant entrant dans la machine.

$V_s$  : La tension phase-neutre efficace aux bornes de la machine.

$Z_{\text{eq}}$  : l'impédance totale équivalente de la machine asynchrone.

$I_h$  : Courant actif de la branche de magnétisation.

$I_u$  : Courant réactif de la branche de magnétisation.

$R'_r$  : Résistance rotorique ramenée au stator [ $\Omega$ ].

$X'_r$  : Réactance de fuite du rotor ramenée au stator [ $\Omega$ ].

$Z_m$  : Impédance de la branche de magnétisation

$V_0$ : La tension nominale à vide aux bornes d'un enroulement statorique [V]

$E_1$  : La fem (force électromotrice) induite d'une phase statorique [V]

$I_0$  : Le courant d'une phase statorique à vide [V]

$P_{\text{ab}}$  : La puissance active absorbée [W].

$Q$  : la puissance réactive absorbée [VAR]

$S$  : la puissance apparente [VA]

MAS : Machine asynchrone.

D.D.P : Différence de potentiel.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## Introduction générale

Le concept du mouvement mécanique à partir d'une source de courant électrique n'est pas nouveau, mais les découvertes du passé constituent la base des développements des moteurs avancés d'aujourd'hui [5].

Depuis plusieurs années, le moteur électrique constitue un élément essentiel et prépondérant dans la vie quotidienne de l'homme, notamment dans le secteur industriel, les systèmes de pompage, le domaine de la traction ferroviaire et de l'automobile. Ces domaines nécessitent l'utilisation des moteurs électriques pour la plupart des procédés afin d'assurer la conversion dite électromécanique de l'énergie électrique en énergie mécanique [5].

L'orientation vers les recherches aboutissant à des meilleures exploitations d'un robuste actionneur, est très justifiée, à savoir, le moteur asynchrone à cage qui a une construction simple qui limite le coût et augmente le rapport de puissance massique. C'est pourquoi la machine asynchrone est une machine en pleine expansion dans l'industrie [7].

De la conversion d'énergie dans une machine asynchrone résulte des pertes dans la machine qui sont dissipées sous forme de chaleur, en conséquence les performances de cette dernière diminuent [10].

Comme toute autre machine, la machine asynchrone n'est pas à l'abri d'un dysfonctionnement, elle peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques au niveau du stator ou du rotor et dans le réseau d'alimentation. Afin d'améliorer sa prévention en cas d'un défaut, la connaissance de la répartition et localisation des pertes et leur estimation peut contribuer à améliorer ses performances et sa conception [8].

Ainsi, l'objectif de ce mémoire est d'évaluer les pertes dans un moteur asynchrone lorsqu'il est en mode sain et lorsqu'il est soumis à une coupure d'une phase d'alimentation.

Lorsqu'une phase est coupée, cela entraîne un déséquilibre dans le fonctionnement de la machine asynchrone. La tension et le courant dans les phases restantes ne sont plus équilibrés. Ce qui affecte le fonctionnement normal de la machine.

Pour mener à bien notre travail, on utilise le modèle du schéma électrique équivalent en T du moteur asynchrone, dont on identifiera ses paramètres électriques. Ce dernier nous servira dans le cas du défaut cité ci-dessus.

Ce mémoire décrit l'ensemble de notre travail. Il est constitué de quatre chapitres :

Le premier chapitre porte sur l'état de l'art de la machine asynchrone, ainsi ses différents pertes, suivis par la présentation des défauts qui peuvent l'affecter.

Suivi par le deuxième chapitre où nous estimons les paramètres du schéma électrique équivalent par deux méthodes (classiques et itérative) qui sont basées sur deux essais (à vide et en court-circuit). Nous terminons cette partie par la présentation de la méthode théorique pour déterminer les caractéristiques de fonctionnement basées sur ce schéma équivalent.

Par la suite dans le troisième chapitre nous validons le modèle du schéma électrique en utilisant les performances du fonctionnement théoriques et expérimentales en charge. Une fois validé, il est exploité pour étudier les pertes, particulièrement, en présence du défaut de coupure d'une phase d'alimentation.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I :**

# **Généralités, pertes et**

# **défauts d'une**

# **machine asynchrone**

## I.1. Introduction

Un moteur asynchrone, également appelé moteur à induction, est un moteur à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone vient du fait qu'il tourne à une vitesse inférieure à la vitesse du champ magnétique du stator. Il est aujourd'hui largement utilisé dans de nombreux domaines, notamment dans les transports (métro, trains, propulsion navale), l'industrie (machines-outils) et l'électroménager. À l'origine, il était utilisé uniquement comme moteur électrique, mais grâce à la technologie électronique de puissance, il est de plus en plus utilisé comme générateur. C'est le cas par exemple des éoliennes [1]. Lors du fonctionnement de moteur asynchrone à cage, un processus de conversion d'énergie se produit, de l'énergie électrique à l'énergie mécanique ou vice versa. Au cours de ce processus, une partie de l'énergie est dissipée sous forme de pertes de puissance dans différentes parties du moteur, ce qui se manifeste sous forme de chaleur, et qui affecte directement le rendement global de la machine. Certaines pertes de puissance sont difficiles à évaluer car de nombreux phénomènes les provoquent [2].

La machine asynchrone peut être affectée par des défauts électriques ou mécaniques et au niveau du réseau d'alimentation. Les défauts peuvent être causés par des problèmes de fabrication ou une utilisation non conforme de la machine. Un arrêt soudain dû à une anomalie peut entraîner des pertes financières et une menace pour la sécurité des personnes.

Dans ce chapitre on donne quelques notions sur la machine asynchrone, tel que son fonctionnement, et ces éléments constitutifs et aussi les différentes définitions des défauts et des pertes qui caractérisent son fonctionnement.

## I.2. Généralités sur la machine asynchrone

### I.2.1. Définition et représentation du moteur asynchrone

Un moteur asynchrone figure (I.1) est un moteur qui fonctionne en courant alternatif. Il n'y a aucune connexion entre le stator et le rotor. L'arbre tourne à une vitesse différente de celle du champ magnétique tournant, c'est pourquoi on l'appelle asynchrone. On l'appelle aussi moteur à induction dans lequel le circuit magnétique est associé à deux ou plusieurs circuits en mouvement relatif dans lesquels l'énergie est transférée par induction électromagnétique de la partie fixe appelée stator à la partie mobile appelée rotor et vice versa [3].

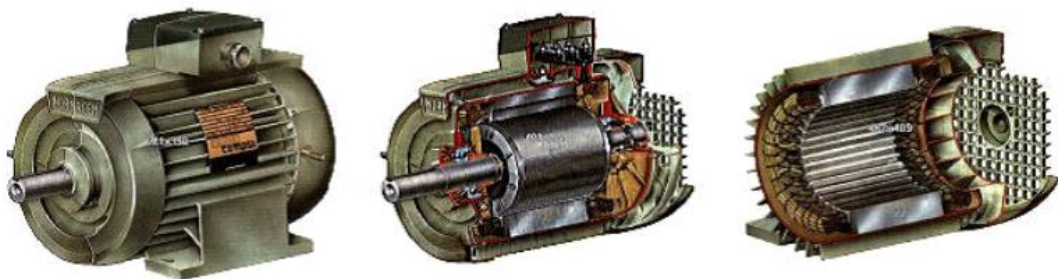


Figure I.1. Machine Asynchrone

Voici les différents symboles employés pour représenter le moteur asynchrone figure (I.2) :

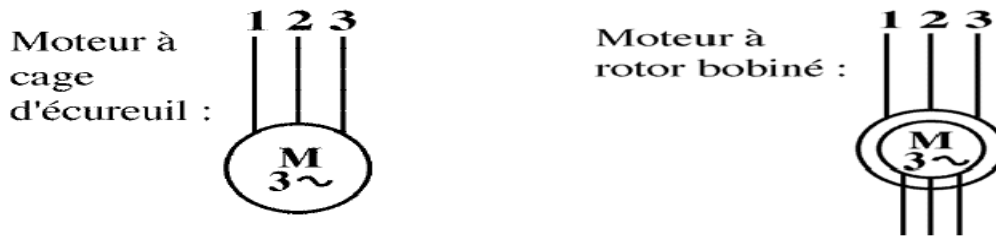


Figure I.2. Symbole du moteur asynchrone

### I.3. Constitution d'un moteur asynchrone

Un moteur à induction est constitué d'une partie fixe appelée stator et d'une partie rotative appelée rotor. Contrairement aux moteurs synchrones et à courant continu, seul l'enroulement du stator est couplé au réseau électrique, et sa tension (amplitude et fréquence) définit l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont connectés les uns aux autres. Les moteurs asynchrones n'ont donc ni enroulements de champ ni aimants permanents. Quant au flux rotorique nécessaire à la création du couple électromagnétique, il est généré par induction. La figure (I.3) représente une machine asynchrone. D'un point de vue mécanique, un moteur asynchrone se divise en trois parties essentielles :

- **Le Stator** : La partie fixe est la partie reliée à l'alimentation.
- **Le Rotor** : composant rotatif qui fait tourner les charges mécaniques.
- **Les Roulements** : Mécanisme de support qui constitue une pièce mécanique permettant ainsi à l'arbre du moteur de tourner [4].

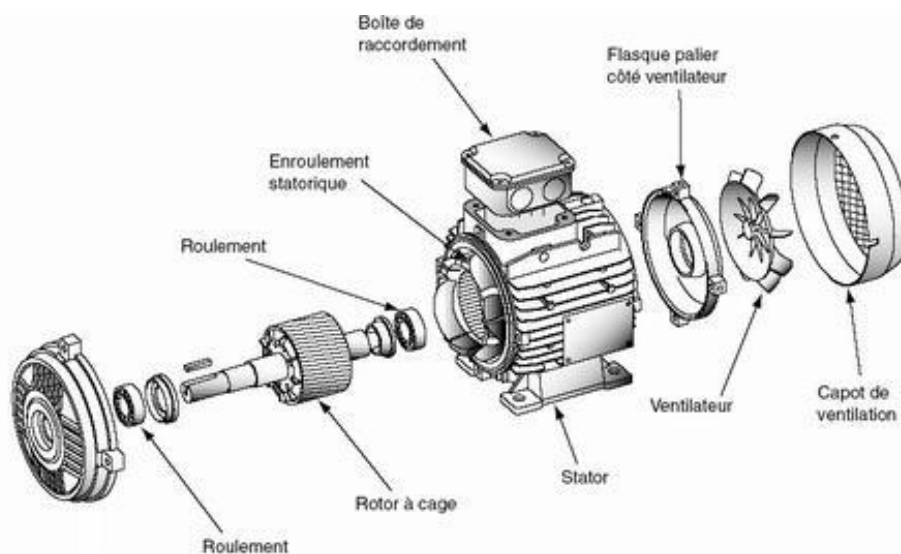


Figure I.3 Vue éclatée d'un moteur asynchrone

### I.3.1. Le stator

Le stator d'un moteur asynchrone triphasé figure (I.4) est le même que le stator d'un moteur synchrone ou d'un alternateur, qui génère un champ magnétique tournant. Il s'agit en fait d'un circuit magnétique en forme de couronne entièrement feuilleté avec un certain nombre d'encoches identiques régulièrement creusées sur sa circonférence intérieure. Dans ces fentes sont placés les faisceaux de conducteurs qui forment les enroulements du stator [5]

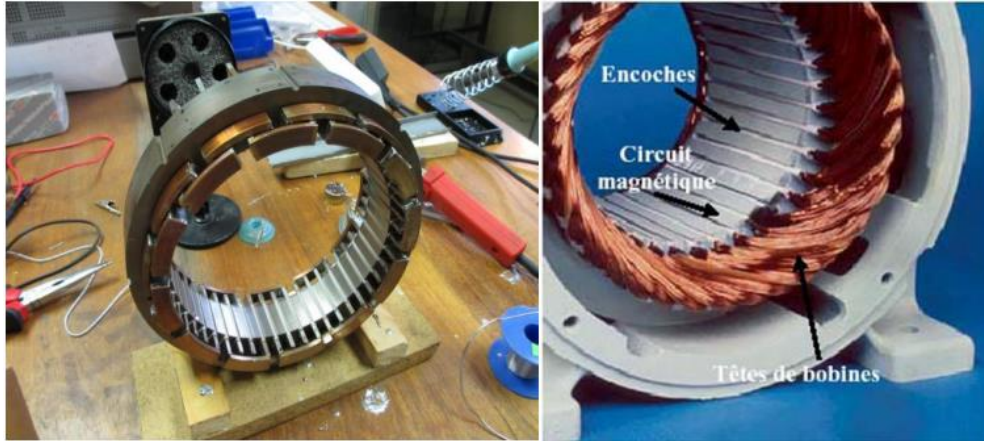


Figure I.4 Stator d'une MAS

#### ➤ Couplage du stator

Dans une machine asynchrone à cage, le couplage du stator fait référence à la manière dont l'enroulement du stator est connecté. Il existe deux catégories principales de couplage :

- **Couplage étoile** : Dans ce mode de couplage, les enroulements du stator sont connectés en forme d'étoile. Chaque enroulement est relié à une phase de tension du réseau électrique. Les moteurs de faible puissance utilisent généralement ce type de couplage.
- **Couplage triangle** : Les enroulements du stator sont connectés en triangle dans ce mode de couplage. Plus précisément, le point de jonction entre deux enroulements est connecté à la phase de tension du réseau électrique. Les moteurs de puissance plus élevée utilisent généralement ce type de couplage.

### I.3.2. Le rotor

Il est placé à l'intérieur du stator porte l'enroulement dans lequel doit circuler les courants induits. Le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont en général de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. En pratique, on trouve deux types de rotor : bobinés ou à cages d'écureuil [5].

### a) Rotor à cage d'écureuil

Il est constitué de tôles empilées de façon à former un cylindre comportant des encoches où sont logés des conducteurs en aluminium coulé ou en cuivre dont les extrémités sont court-circuitées par des couronnes de même nature formant ainsi une cage d'écureuil. On parle dans ce cas de "machines asynchrone à cage d'écureuil" qui est représenté par la figure (I.5) [6].

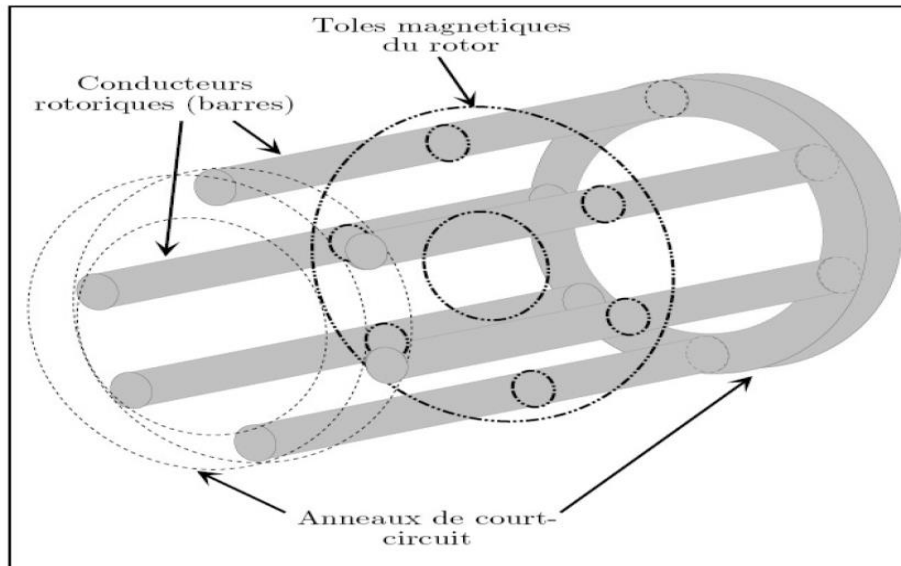


Figure I.5 Schéma du rotor à cage d'écureuil

### b) Rotor bobiné

Les tôles du rotor sont formées d'encoches où sont logés des conducteurs d'un bobinage triphasé qui produit un champ rotorique ayant le même nombre de pôles que le champ statorique. On peut accéder à cet enroulement par l'intermédiaire de trois bagues figure (II.6) sur lesquelles frottent trois balais et on peut jouer sur la résistance de l'enroulement rotorique pour augmenter le couple de démarrage [7].

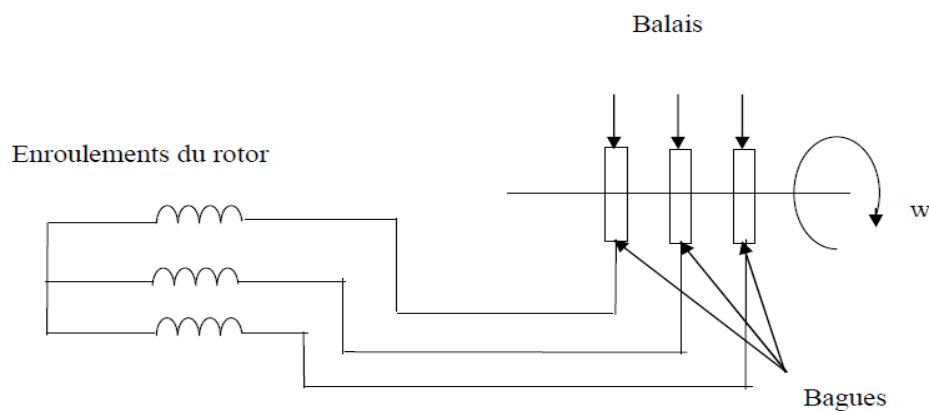


Figure I.6 Schéma d'un rotor bobiné

#### I.4. Principe et caractéristiques de fonctionnement de la MAS [8] [9] [10]

Son principe de fonctionnement repose sur le phénomène d'induction entre le champ magnétique tournant statorique et les courants induits dans un rotor en cage d'écurie figure (II.7). Le champ magnétique tournant crée des courants dans le rotor.

Ce dernier produit son propre champ magnétique, qui interagit avec le champ tournant du stator pour produire un couple, ce qui provoque la rotation du rotor. Il est important de noter que la notion de glissement découle du fait que la vitesse de rotation du rotor est inférieure à celle du champ tournant.

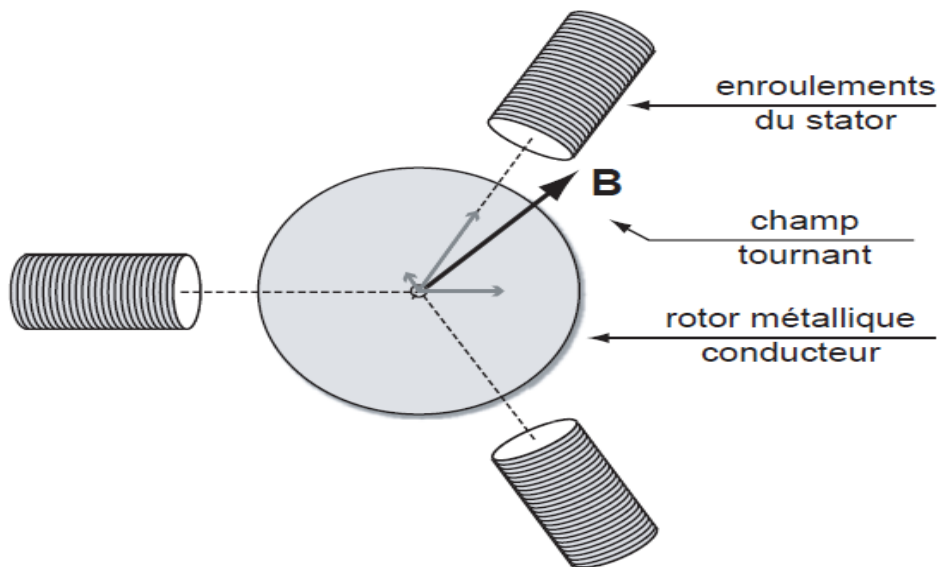


Figure I.7 Schéma de principe du fonctionnement du moteur asynchrone.

##### I.4.1. La vitesse de synchronisme

On appelle vitesse synchrone la vitesse  $N_s$  à laquelle tourne le flux tournant c'est-à-dire le champ statorique qui est proportionnelle à la fréquence de la source d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles :

$$N_s = \frac{60f}{p} \text{ [tr /min]} \quad (\text{I-1})$$

##### I.4.2. Le champ tournant

Les courants statoriques créent un flux magnétique variable à travers les inductances Propres et mutuelles en fonction du temps, appelé champ tournant qui tourne à la vitesse synchrone.

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} \text{ [rad/s]} \quad (\text{I-2})$$

Avec :

$\Omega_s$  : Vitesse synchrone du champ tournant en  $[rad / s]$ .

$\omega_s$  : Pulsation électrique synchrone du champ tournant en  $[rad / s]$ .

$p$  : Nombre de paires de pôles.

### I.4.3. Le glissement

C'est l'écart relatif de la vitesse de rotation du rotor par rapport à la vitesse de synchronisme, le rotor tourne à la vitesse  $N$  différente de  $N_s$  ce qui nous permet de dire que le rotor glisse vis-à-vis du champ tournant, ce glissement dépend de la charge et il a pour expression :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (I.3)$$

Avec :

$N_s$  : Vitesse de rotation du champ statorique en  $[tr / min]$

$N$  : Vitesse de rotation du rotor  $[tr / min]$

$\Omega_s = 2\pi.N_s [rad / s]$

$\Omega = 2\pi .N [rad / s]$

### I.4.4. Le couple

Le rotor tourne sous l'effet du couple, qui est généré par le flux tournant réel qui est le flux d'entrefer résultant des deux flux rotorique et statorique, appelé couple électromagnétique. On distingue aussi le couple utile qui est disponible sur l'arbre du moteur sous forme de puissance entraînant la charge.

### I.5. Bilan des puissances et des pertes

Lors de la transformation d'énergie électrique en énergie mécanique, apparaît une forme intermédiaire d'énergie, appelée énergie électromagnétique qui est véhiculée du stator vers le rotor à travers l'entrefer qui sera convertie en énergie mécanique capable d'entraîner une charge. Il y a aussi une partie stockée sous forme d'énergie magnétique et le reste étant dissipé sous forme de pertes. Le bilan de puissance et des pertes est représenté dans la figure (II.8) [11].

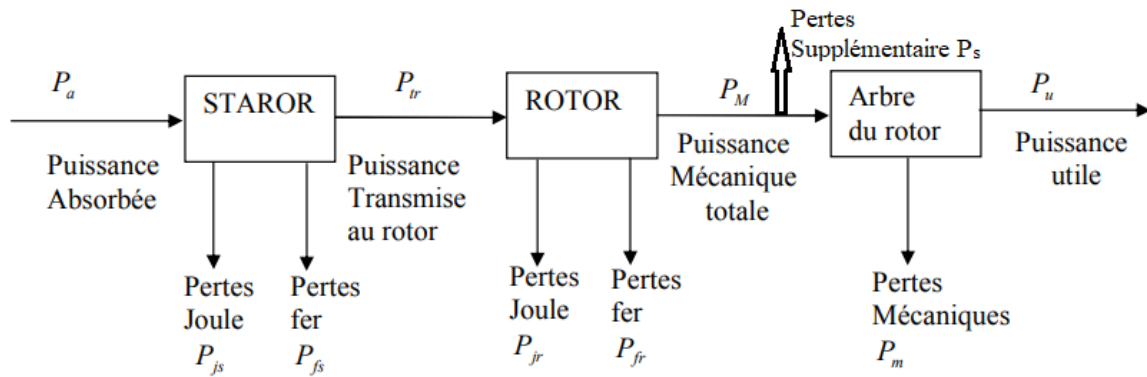


Figure I.8 Répartition des puissances et des pertes d'un moteur asynchrone à cage

### I.5.1. Les différentes puissances dans la machine asynchrone [8]

#### ✓ La Puissance électrique absorbée $P_a$

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

$$P_a = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad [\text{W}] \quad (\text{I-4})$$

Avec :

$P_a$  : Puissance électrique absorbée [W].

$U$  : Tension entre deux phases du moteur.

$I$  : Courant de ligne.

$\cos \varphi$  : Facteur de puissance.

#### ✓ La puissance transmise $P_{tr}$

La puissance transmise au rotor à travers l'entrefer est la partie de la puissance absorbée qui n'est pas perdue dans les enroulements du stator et dans le fer statorique elle est donnée comme suit :

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fs}) \quad [\text{W}] \quad (\text{I-5})$$

Avec :

$P_{tr}$  : La puissance transmise à travers l'entrefer [W].

$P_a$  : Puissance électrique absorbée [W].

$P_{js}$  : pertes joule statoriques [W].

$P_{fs}$  : pertes fer statoriques [W].

✓ **La puissance électromagnétique  $P_{em}$**

La puissance électromagnétique  $P_{em}$  transmise au rotor est donné par :

$$P_{em} = P_{tr} \quad [W] \quad (I-6)$$

Avec :

$P_{em}$  : La puissance électromagnétique [W].

$P_{tr}$  : La puissance transmise à travers l'entrefer [W].

✓ **La puissance mécanique  $P_M$**

La puissance mécanique développée par le rotor est égale à la puissance électromagnétique que le stator lui fournit diminuée des pertes fer et des pertes joule au rotor qui donné par la relation suivante :

$$P_M = P_{em} - (P_{fr} + P_{jr}) \quad [W] \quad (I-7)$$

Avec :

$P_M$  : la puissance mécanique [W].

$P_{em}$  : la puissance électromagnétique [W].

$P_{fr}$  : pertes fer rotoriques [W] généralement négligées .

$P_{jr}$  : pertes joule rotoriques [W].

✓ **Puissance utile  $P_u$**

C'est la puissance transmise à la charge, elle est donnée par l'expression suivante :

$$P_u = P_M - P_m - P_s \quad [W] \quad (I-8)$$

Avec :

$P_u$  : la puissance utile [W].

$P_M$  : Puissance mécaniques [W].

$P_m$  : Pertes mécaniques [W].

$P_s$  : Pertes supplémentaires [W].

✓ **Le couple utile**

Le rotor tourne à la vitesse  $\Omega$  et transmis à la charge une puissance utile  $P_u$  :

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \text{ [N.m]} \quad (\text{I-9})$$

### ✓ Le rendement

Le rendement d'un moteur asynchrone est le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I-10})$$

## I.5.2. Les différentes pertes dans la machine asynchrone [6] [7] [5]

### I.5.2.a. Les Pertes dans le circuit électrique

Ce sont les pertes dues à l'effet Joule dans toutes les parties conductrices de la machine asynchrone (enroulements du stator et cages d'écureuil) à travers lesquelles circule le courant, et elles peuvent être obtenues avec précision par des calculs théoriques avec résistance et courant connus ou par des essais réels.

#### ✓ Les pertes par effet Joule dans le stator

Ce sont des pertes électriques dissipées par effet joule dans les enroulements statoriques, elles varient en fonction du carré des courants dans ces enroulements qui sont déterminées par la formule suivante :

$$P_{js} = m_1 R_s I_s^2 \quad (\text{I-11})$$

Avec :

$P_{js}$  : Pertes par effet joule au stator [W].

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique[Ω].

$I_s$  : Courant d'une phase statorique [A].

$m_1$ : Nombre de phase du stator.

#### ✓ Les pertes par effet Joule dans le rotor

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

$$P_{jr} = m_1 R_r I_r^2 \quad (\text{I-12})$$

Avec:

$P_{jr}$  : Pertes par effet joule au rotor [W].

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

$I_r$  : Courant d'une phase au rotor [A].

$m_1$ : Nombre de phase du rotor.

### I.5.2.b. Les Pertes dans le circuit magnétique

Il s'agit des pertes fer générées dans le circuit magnétique du stator, qui dépendent de la tension d'alimentation et de la fréquence du courant statorique, ainsi que des pertes par hystérésis et des pertes par courants de Foucault. Dans le rotor, en raison de la basse fréquence des courants rotorique, les pertes fer sont négligeable.

#### ✓ Pertes par hystérésis

Le phénomène d'hystérésis est une propriété liée aux domaines magnétique et aux frottements de particule dues aux changements continuels du sens de l'aimantation et qui sont proportionnelles la fréquence et la surface du circuit magnétique.

Il est la cause des pertes dans les parties en fer des machines électriques qui sont soumises à un champ magnétique variable. Ils sont en fonction du matériau utilisé et de la densité maximale du flux. Sa relation est donnée comme suit :

$$P_{\text{hys}} = K_h f B_{\text{max}}^2 \quad (\text{I-13})$$

Avec :

$P_{\text{hys}}$  = Pertes par hystérésis pour 1 kg de matière [Watt].

$K_h$  = Le coefficient des pertes par hystérésis (spécifique du matériau).

$B_{\text{max}}$  = L'induction maximale [Tesla].

$f$  = La fréquence [Hertz].

#### ✓ Les Pertes par courants de Foucault

Pour expliquer les pertes par courants de Foucault, considérons un noyau cylindrique en fer qui tourne entre les pôles d'un aimant, En tournant, le noyau coupe des lignes de flux une tension est induite dans le noyau même, avec les polarités indiquées figure (II.9). Cette tension fait circuler des courants dans la masse du noyau. Ces courants, auxquels on donne le nom de courants de Foucault, provoquent un échauffement, par effet Joule, du noyau de fer [10].

$$P_F = K_f (e f B_{\max})^2 \quad (I-14)$$

Avec :

$P_F$  : Perte fer par courants de Foucault pour 1 kg de matière [W].

$K_f$  : Coefficient caractéristique de la tôle.

$e$  : épaisseur de la tôle [m].

$B$  : Induction maximal dans l'entrefer [T].

$f$  : fréquence de champ tournant résultant [Hz].

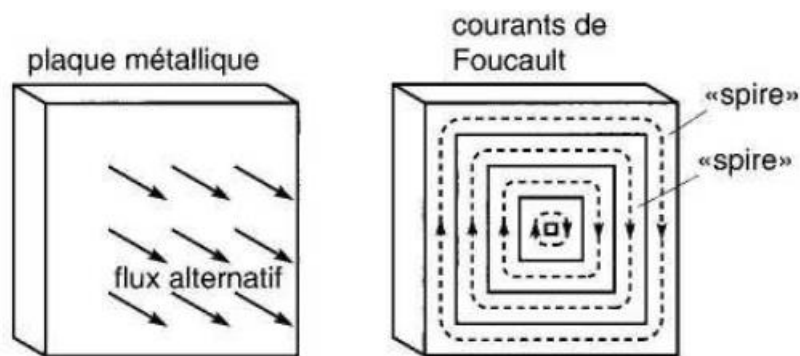


Figure I.9 Circulation des courants de Foucault dans une plaque métallique

### I.5.2.c. Pertes mécaniques

Ce sont des pertes qui proviennent du frottement du rotor sur des organes fixes (paliers) et du frottement de l'air sur l'induit et sur le ventilateur destiné au refroidissement de la machine qui contribuent à l'échauffement de la machine. Plus la machine tourne vite, plus les pertes mécaniques deviennent importantes. Ces pertes dépendent de nombreux facteurs et il est très difficile de prédire leur valeur. Pour les déterminer avec exactitude, il faut faire des essais sur la machine.

$$P_m = k_t \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 (D_{1\text{ext}} \cdot 10^{-3}) \quad (I-15)$$

Avec :

$k_t = 1,3(1 - D_{1\text{ext}})$ , pour  $0,1 \leq D_{1\text{ext}} \leq 0,5$  m

$P_m$  : puissance mécanique [W].

$n_1$  : vitesse de rotation synchrone [tr/min].

$D_{1\text{ext}}$  : diamètre extérieur du stator [m].

### I.5.2.d. Les pertes supplémentaires

Malgré le grand nombre de publications sur le thème des pertes de charge parasites, il existe encore des désaccords considérables sur sa définition et la manière dont ses composants sont classés [11].

Alger P.L [12] fournit la définition la plus objective, affirmant que les « pertes de charge supplémentaires » font référence à l'excédent de toutes les pertes subies par un moteur à un courant de charge donné, dépassant la somme des pertes en joules calculées pour le courant, des pertes de fer à vide et des pertes causées par la friction et la ventilation.

Une définition semblable est donnée sous une forme mathématique comme [14] :

$$P_s = P_t - P_{js} - P_{jr} - P_{fs} - P_m \quad [W] \quad (I-16)$$

Avec :

$P_s$  : Pertes supplémentaires en charge [W].

$P_t$  : Pertes totales en charge [W].

$P_{js}$  : Pertes joules au stator [W].

$P_{jr}$  : Pertes joules au rotor [W].

$P_{fs}$  : Pertes fer statorique estimées à partir de l'essai à vide [W].

$P_m$  : Pertes mécaniques [W].

Des pertes sont également constatées en raison des harmoniques d'écoulement, en particulier des écoulements de pulsations dentaires provoqués par des entailles dans l'entrefer.

Ces harmoniques est uniquement attribuée aux variations de la réluctance de l'entrefer, de l'amplitude du flux principal et des ouvertures des fentes.

Ont subdivise les pertes supplémentaires en charge en deux composantes. La composante de fréquence fondamentale et la composante à hautes fréquence [6].

L'origine des pertes supplémentaires est due aux champs de fuite dans les encoches et dans les têtes de bobines.

Pour une meilleure compréhension, on peut subdiviser les pertes supplémentaires en deux parties, une dans le circuit électrique et l'autre dans le circuit magnétique comme suit [12] :

#### ✓ Circuit électrique

Les discontinuités géométriques d'une machine asynchrone au niveau de l'entrefer qu'est faible créent des flux de fuite harmonique des phases et d'encoche qui engendre des pertes dans les conducteurs rotoriques. Ces harmoniques sont appelés harmonique d'espace.

**a) Les pertes dues au flux différentiel de phase**

Le fait que le nombre de phases soit fini entraîne une distribution de la force magnétomotrice (FMM) dans l'entrefer qui diffère de la répartition sinusoïdale, celle-ci supposant un nombre infini de phase et d'encoche par phase, à cet écart correspond un flux différentiel de phase qui engendre des pertes, non négligeable dans les rotors à cage.

**b) Les pertes dues au flux différentiel d'encoche**

Le fait que le nombre d'encoches par phase soit fini entraîne une distribution de la force électromotrice dans l'entrefer qui s'écarte de la répartition précédente, le nombre fini de phases entraîne la création d'un flux différentiel d'encoche (appelé aussi zigzag) qui engendre des pertes.

**c) Les pertes dues à l'inclinaison des encoches et aux contacts-barre-tôlerie**

Pour réduire le bruit et les couples parasites due aux variations de perméance (résistivité magnétique) d'entrefer, on incline parfois les encoches du rotor d'un ou plusieurs pas dentaire. Cette technique n'est intéressante que pour les moteurs de faible puissance en raison des pertes supplémentaires qu'elle entraîne, dues aux différences de potentiel (d.d.p) harmoniques qui apparaissent entre les barreaux et au défaut d'isolant de ceux-ci par rapport aux tôles magnétique.

**d) Pertes supplémentaires à fréquence élevée**

Dans le cas où la fréquence  $f$  est élevée, la densité de courant dans une section droite de conducteur n'est plus uniforme. Cela est dû à l'action du flux propre interne du conducteur qui rejette le courant vers la périphérie de celui-ci (l'effet de peau).

**✓ Circuit magnétique****a) Pertes supplémentaires d'extrémité**

Les plaques de serrage ou tôles d'extrémités et une partie de la culasse sont poignées par les flux de fuite des têtes de bobines statoriques, et rotoriques. Ces flux produisent des pertes par courant de Foucault non négligeable, surtout pour les machines à très fortes charges linéique de courant.

La détermination de ces flux de fuite est très difficile, compte tenu de la géométrie. Cependant des auteurs spécialisés utilisent des développements complexes qui font intervenir soit le calcul des champs par élément fini, soit un réseau d'impédance, soit la théorie des images magnétique.

**b) Pertes dues aux harmoniques d'espace**

Elles sont dues aux variations d'induction à fréquence élevées, produites par les discontinuités géométriques de la machine, même lorsque celle-ci est alimentée en onde sinusoïdale. En effet, la présence des encoches dans l'entrefer implique, d'une part des variations de perméance de celui-ci et d'autre part une distribution discontinue de la force

magnétomotrice. Ces deux causes d'harmonique d'espace de flux entraînent des pertes par pulsation dans les dents et à la surface des pôles.

Ces pertes dues aux variations de perméance existent même à vide, alors que celle dues aux harmoniques de force magnétomotrice sont fonction des courant et donc des pertes en charge.

### **I.6. Les différents défauts de la machine asynchrone**

Un défaut est une anomalie de comportement au sein du système. Ce concept est important dans les opérations de surveillance pour la conduite et la maintenance des processus industriels.

On peut trouver différent type de défaut dans la machine asynchrone lors de son fonctionnement qui se résume :

- Défauts d'ordre mécanique
- Défauts d'ordre électrique
- Défauts dû au réseau d'alimentation

#### **I.6.1. Défauts dû au réseau d'alimentation**

Les réseaux et les installations électriques sont le siège d'incidents de nature aléatoire, dont les plus fréquents sont :

- Court-circuit entre les phases.
- Coupures de phase d'alimentation.
- Déséquilibre des tensions d'alimentation.

Les répercussions de ces anomalies sur la continuité du service et le fonctionnement des équipements dépendent de la nature du défaut. Ce dernier est provoqué soit dans les réseaux aériens soit par des contraintes de nature :

- Climatique (pluie, foudre).
- D'environnement (branches d'arbres, plombes de chasses).
- Par suite de l'interconnexion des différents réseaux.

Il en résulte que les installations électriques peuvent subir un nombre difficilement prévisible de perturbations de tension dont l'influence se caractérise par, soit une chute de tension transitoire, soit une coupure brève. Dans les cas les plus graves, cela provoque la coupure de longue durée [12].

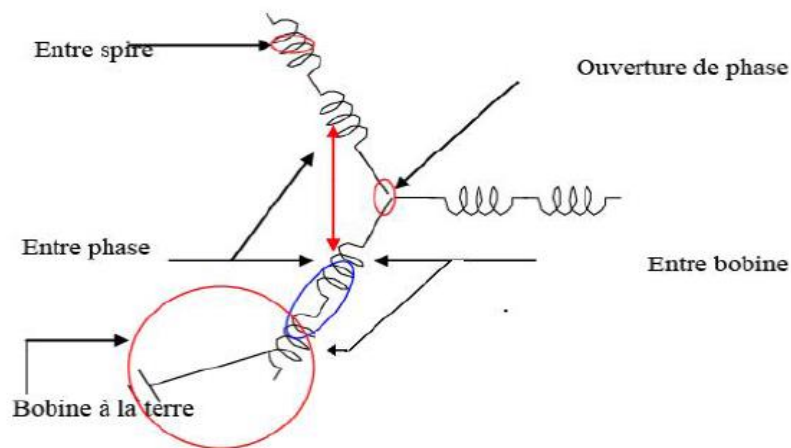
#### **I.6.2. Défauts d'ordre électrique [13]**

Les défaillances d'ordre électrique sont des défauts qui touchent les parties électriques de la machine. Elles peuvent affecter aussi bien le bobinage dans le stator que la cage d'écureuil au niveau du rotor.

### I.6.2.1. Défauts statoriques

Les défaillances des circuits électriques statoriques peuvent avoir diverses origines. A titre d'exemples, on peut citer :

- Rupture d'isolation.
- Les courts-circuits entre phases : provoquent un arrêt net de la machine.
- Les courts-circuits entre phase et neutre : provoquent un déséquilibre des phases.
- Les courts-circuits inter-spires : ce sont les plus couramment rencontrés et les plus nuisibles ils se produisent à l'intérieur des encoches.
- Rupture des connexions.



**Figure I.10 Représentation des différents défauts statoriques.**

Ces défauts ont généralement pour cause principale le vieillissement prématuré des isolants dû aux vibrations et échauffements excessifs de la machine ainsi qu'aux surtensions provoquées par les circuits de commande.

### I.6.2.2. Défauts rotoriques

Ces défaillances sont des ruptures totales ou partielles d'une ou plusieurs barres ou d'une portion d'anneau de court-circuit de la cage d'écureuil. Parmi les causes entraînant ces défaillances, on peut citer :

- Surcharge de la machine.
- Démarrages trop fréquents induisant des courants élevés dans les barres ou dans les segments d'anneaux.
- Contraintes mécaniques causées par des forces électromagnétiques ou des vibrations mécaniques excessives.
- Utilisation de la machine dans un environnement hostile.

La cassure d'une barre ou d'une portion d'anneau n'entraîne pas l'arrêt immédiat de la machine mais cela cause :

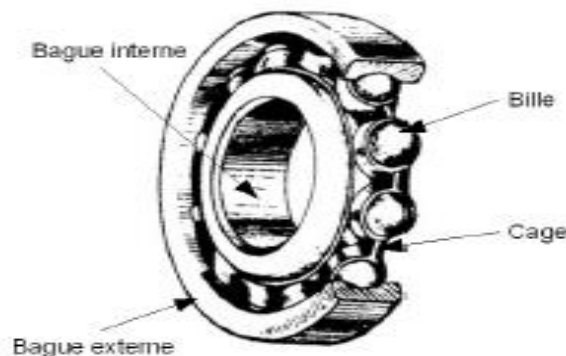
- Un changement de la signature du courant de ligne.
- Un changement de la signature de la tension.
- Un changement de la densité de flux magnétique dans l'entrefer.
- Des vibrations.
- Des fluctuations de la vitesse.
- Un échauffement de la machine.

### I.6.3. Défauts d'ordre mécanique [14]

#### I.6.3.1. Défauts de roulement

Les roulements sont l'une des causes les plus importantes des défaillances des machines tournantes Ils se composent généralement de figure (I.11) :

- De deux bagues : une bague intérieure et une bague extérieure.
- De corps roulants permettant la rotation relative de ces deux bagues,
- D'une cage séparant les corps roulants.



**FigureI.11 Roulement à billes**

Une mauvaise lubrification, des contraintes radiales et axiales importantes, un mauvais positionnement durant l'assemblage ou un désalignement peuvent causer ces défaillances. Comme incidences sur la machine.

#### I.6.3.2. Défaut de flasque

Une excentricité de la partie tournante de la machine est causée par un mauvais positionnement des flasques lors de la construction de la machine. Les vibrations excessives

de la machine et la modification de la signature du courant sont les principaux symptômes de ce type de défaut [15].

### I.6.3.2. Défauts d'excentricité [16]

Les défauts mécaniques sont généralement manifestés au niveau de l'entrefer par des défauts d'excentricité. Deux causes principales aggraveront l'excentricité lors du fonctionnement de la machine. La première est inhérente à la chaîne cinématique dans laquelle la machine intervient et peut imposer une force radiale sur son arbre, ce qui entraîne une usure des roulements et une amplification du décentrement. Le deuxième phénomène, qui pourrait aggraver l'excentricité, est intrinsèque au fonctionnement de la machine.

Trois catégories d'excentricité sont généralement distinguées figure (I.12) :

**L'excentricité statique** : Généralement due à un désalignement de l'axe de rotation du rotor par rapport à l'axe du stator. La cause principale c'est un défaut de centrage des flasques.

**L'excentricité dynamique** : Le rotor est positionné au centre de l'alésage mais ne tourne plus autour de son axe.

**Excentricité mixte** La somme des deux cas présentés ci-avant.

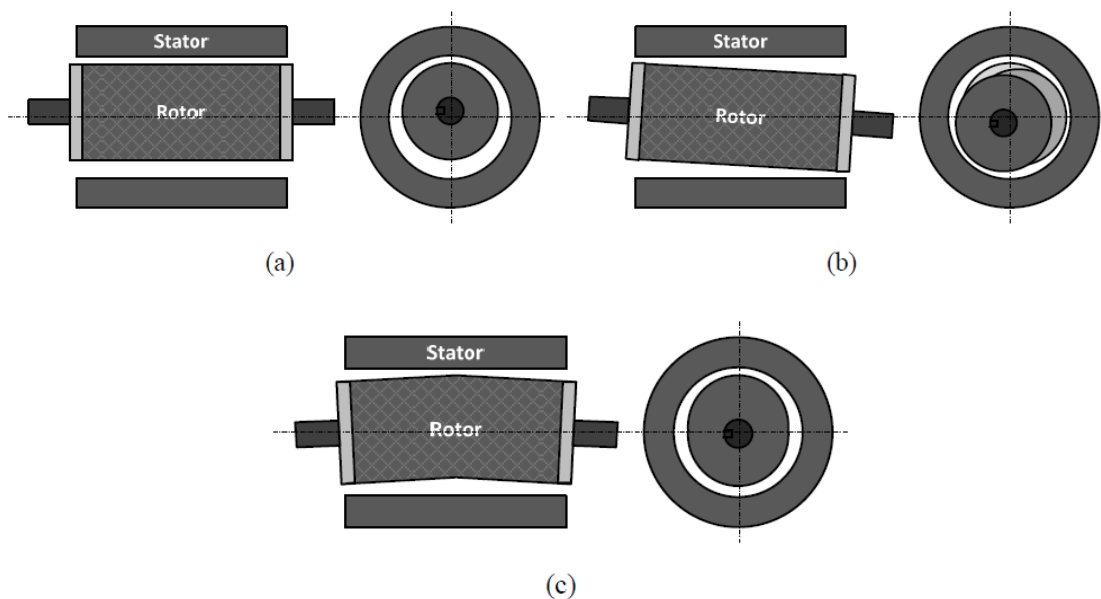


Figure I.12 Types d'excentricité : (a) statique ; (b) dynamique ; (c) mixte

## II.7. Les causes des défauts

La majorité des défauts des moteurs asynchrones résultent de la coexistence de contraintes nocives de différents types : électriques, magnétiques, mécaniques, thermiques ou dynamiques [16]. Leurs origines sont multiples et variées :

- Dans la conception du moteur.
- Dans l'assemblage du moteur.

- Dans l'installation du moteur.
- Dans l'environnement de travail du moteur.

Dans la nature de la charge du moteur. Par ailleurs, les défauts affectants les moteurs peuvent être classés selon leurs origines en deux catégories :

✓ **Les défauts internes :**

Sont provoqués par les constituants de la machine (bobinage du stator et du rotor, circuits magnétiques, cage rotorique, entrefer mécanique, etc...).

✓ **Les défauts externes :**

Ils sont causés par le type d'alimentation utilisée, la charge mécanique ainsi que l'environnement d'utilisation de la machine.

## **II.8 Les conséquences des défauts**

Les défauts de machines asynchrones entraînent de nombreux problèmes qui affectent la rentabilité de l'installation globale et peuvent même entraîner l'arrêt complet du processus industriel [14]. Les conséquences des défauts :

- Fluctuations au niveau du couple et de la vitesse.
- Appel supplémentaire de courant.
- Déséquilibre au niveau de la tension et du courant de ligne.
- Augmentation de la vibration du moteur
- Augmentations des arrêts non programmés entraînant des pertes de production et financières.

## **I.7. Conclusion**

Après avoir donné un aperçu des généralités de la machine asynchrone (construction, fonctionnement, couplage...), nous avons ensuite présenté les différentes pertes de la machine asynchrone et l'ensemble des défauts potentiels.

Le chapitre suivant traitera l'estimation des paramètres électriques et les performances du moteur étudiée.

# **Chapitre II : Estimation des paramètres électriques et performances d'un moteur asynchrone**

## II.1 Introduction

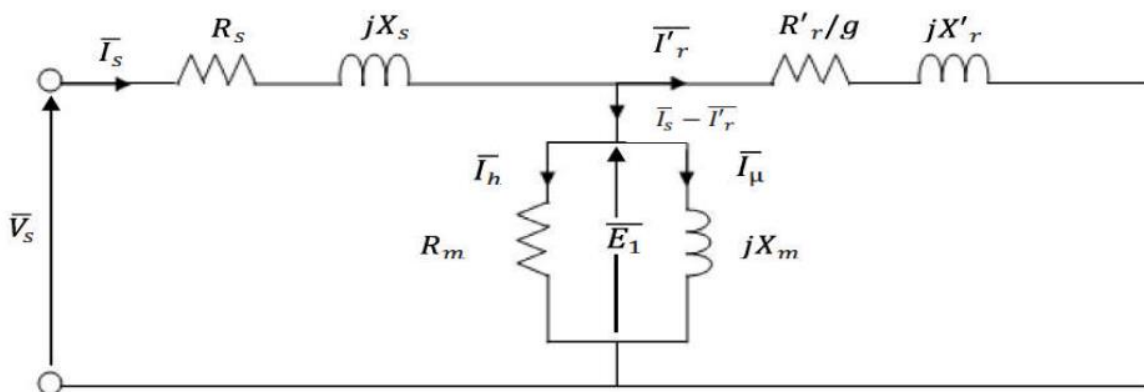
La machine asynchrone transforme l'énergie électrique en énergie mécanique ou l'inverse. Il y'a inévitablement une perte d'énergie ou des pertes de puissance qui affectent directement le rendement de la machine et, par conséquent, la puissance fournie [3].

Dans ce chapitre on exploite la méthode du circuit électrique équivalent simplifié de la MAS pour estimer ses paramètres électriques. Nous présentons ensuite la procédure utilisée pour déterminer les performances théoriques tirées de ce schéma équivalent.

## II.2. Schéma électrique équivalent de la MAS

L'approche de modélisation électrique produit un modèle électrique appelé schéma équivalent, qui permet d'étudier et de concevoir des moteurs asynchrones. Les équations électromagnétiques peuvent être utilisées pour créer un circuit équivalent [17].

La figure (II.1) montre le schéma électrique équivalent simplifié de la machine asynchrone à cage.



**Figure II.1 Schéma électrique équivalent ramené au stator de la machine asynchrone**

La division de la tension au stator par l'impédance totale équivalente est le courant entrant dans le circuit équivalent :

$$\bar{I}_s = \frac{\bar{V}_s}{Z_{eq}} \quad (\text{II.1})$$

$$Z_{eq} = R_s + jX_s + \frac{1}{\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m} + \frac{1}{\frac{R'_r}{g} + jX'_r}} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$I_s$  : le courant simple entrant dans la machine.

$V$  : La tension phase-neutre efficace aux bornes de la machine.

$Z_{eq}$  : l'impédance totale équivalente d'une phase de la machine asynchrone.

$I_h$  : Courant actif de la branche de magnétisation.

$I_u$  : Courant réactif de la branche magnétisation.

$g$  : le glissement.

( $R_s$  et  $X_s$ ) représente la résistance et la réactance statorique respectivement.

( $R_m$ ,  $X_m$ ) représente la branche de magnétisation de la machine qui nous renseigne sur les pertes fer et les pertes magnétiques.

$R'_r$  et  $X'_r$  sont la résistance et la réactance rotorique ramenée respectivement.

### II.3. Détermination des paramètres électriques

#### II.3.1. Méthode des essais classiques

La méthode classique est basée sur trois essais et permet de calculer les paramètres d'une machine asynchrone en utilisant le circuit équivalent et qui sont [18] :

- Un essai à vide.
- Un essai à rotor bloqué.
- Un Essai en courant continu.

#### II.3.2. Le schéma électrique équivalent en T

Le schéma électrique en T a été choisi car il est simple et assez précis. Toutes les grandeurs rotoriques ont été ramenées au primaire (stator) et une branche de magnétisation a été utilisée pour tenir compte des pertes fer.

Les équations électriques suivantes peuvent être déduites à partir de la figure II.1 :

$$\overline{V}_s = (R_s + jX_s) \cdot \overline{I}_s + \overline{E}_1 \quad (\text{II.3})$$

$$\overline{E}_1 = \left( \frac{R'_r}{g} + jX'_r \right) \cdot \overline{I}_r \quad (\text{II.4})$$

$$\overline{I}_s - \overline{I}_r = \overline{I}_m = \frac{\overline{E}_1}{Z_m} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$R'_r$  : Résistance rotorique ramenée au stator [ $\Omega$ ].

$X'_r$  : Réactance de fuite du rotor ramenée au stator [ $\Omega$ ].

$Z_m$  : Impédance de la branche de magnétisation.

$$Z_m = \frac{R_m \cdot X_m}{R_m + X_m} \quad (\text{II.6})$$

$I_m$  : courant de magnétisation [A]

$$\bar{I}_m = \bar{I}_h + \bar{I}_\mu \quad (\text{II.7})$$

## II.4. Essai en courant continu

### II.4.1. Détermination de la résistance statorique $R_s$

La méthode ampèremétrique sur une phase du stator est utilisée pour déterminer la résistance statorique  $R_s$  en mesurant la tension aux bornes de la résistance comme illustré par la figure (II.2), ainsi que le courant qui la traverse. Pour ce faire, une source d'alimentation en continu est nécessaire. On applique ensuite la loi d'Ohm :

$$U = R_s \cdot I_s \Rightarrow R_s = \frac{U}{I_s} \quad (\text{II.8})$$

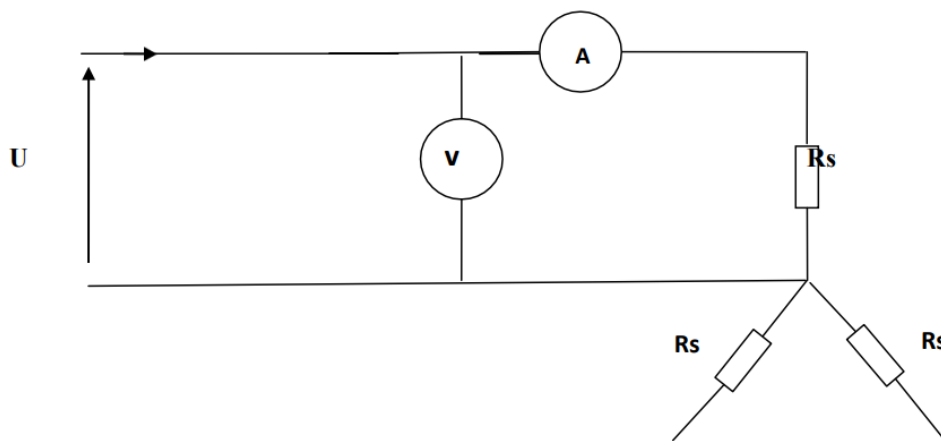


Figure II.2 Schémas de mesure de la résistance statorique en continu

Il faut prendre plusieurs mesures pour différentes valeurs de tension, la résistance sera la moyenne de ces résistances mesurées. Cette mesure est faite à une température ambiante de 23°C.

En exploitant les résultats de mesure présentés dans le tableau suivant :

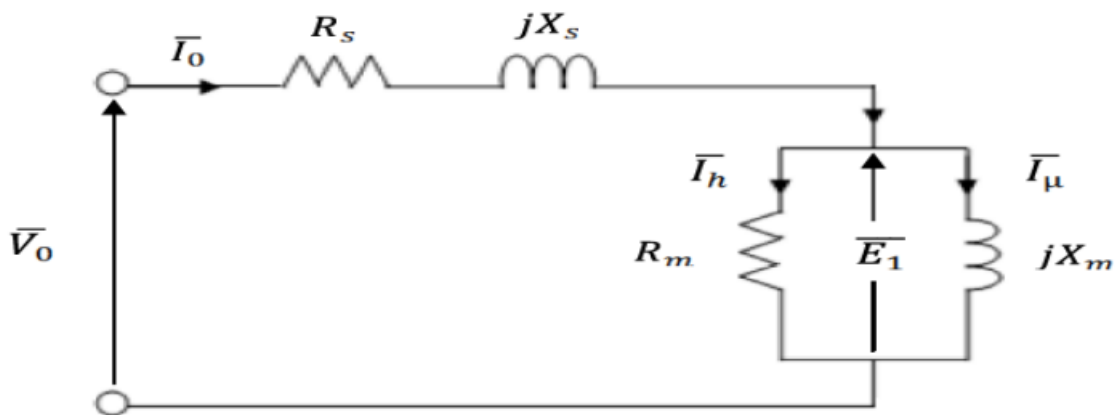
**Tableau II.1 Résultats de mesure de l'essai en courant continu**

Phase [U1 U2]			Phase [V1 V2]			Phase [W1 W2]		
$I_s$ (A)	U (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$I_s$ (A)	U (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$I_s$ (A)	U (V)	$R_s$ ( $\Omega$ )
1	7,5	7,5	1	7,2	7,2	1	7,5	7,5
2	15,5	7,75	2	15	7,5	2	15,8	7,9
3	23,5	7,83	3	23,5	7,83	3	24,5	8,16

On obtient la valeur moyenne de la résistance à  $T_{amb} = 23^\circ\text{C}$  est :  $R_{smoy} = 7.68$  [ $\Omega$ ].

### II.5. Essai à vide en mode sain

En alimentant le moteur avec différentes tensions dans cet essai de la figure (II.3), nous pouvons calculer les pertes fer et les pertes mécaniques en le laissant tourner sans aucune charge.



**Figure II.3: Le modèle de la machine asynchrone à vide**

On relève donc les mesures suivantes :

- Puissance active  $P_0$ .
- Le courant absorbé  $I_0$ .
- La vitesse de rotation  $N$ .

Cet essai est fait avec entrainement, et à une température ambiante de  $24.5^\circ\text{C}$ , qui est illustré par la figure (II.4) :

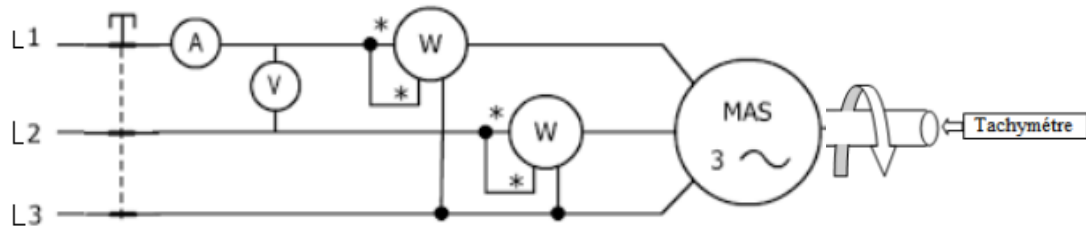


Figure II.4 Circuit de mesure de l'essai à vide

## ❖ Résultat de mesure

Les résultats de mesures sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.2 Résultats de mesure de l'essai à vide avec entrainement

$V_0$ (V)	$I_{0\Delta}$ (A)	$P_0$ (W)	$T$ (°C) d'enroulement	$N$ (tr/min)	$R_s$ ( $\Omega$ )
50	0.62	35	25	1438	8,3461
100	0.60	50	25	1484	8,3461
150	0.86	80	26	1491	8,3782
200	1.15	90	26.1	1495	8,3814
250	1.50	110	26.3	1496	8,3878
300	1.90	130	26.6	1496	8,3974
350	2.65	200	27.2	1496	8,4167
360	2.90	220	27.7	1496	8,4327
370	3.2	250	27.9	1497	8,4391
380	3.5	280	28.4	1497	8,4552
390	3.85	310	28.6	1497	8,4616
400	4.2	360	28.9	1497	8,4712

## II.6. Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques

La puissance électrique absorbée à vide  $P_0$  est égale à la somme des pertes suivantes : les pertes fer au stator  $P_{fs}$ , les pertes par effet Joule au stator  $P_{js}$  et les pertes mécaniques  $P_m$ .

$$P_0 = 3 \cdot R_s \cdot I_0^2 + P_{fs} + P_m \quad [W] \quad (II.9)$$

$$P_0 - 3 \cdot R_s \cdot I_0^2 = P_{fr} + P_m \quad [W] \quad (II.10)$$

On peut tracer la courbe des (pertes fer + les pertes mécanique) en fonction de la tension d'alimentation au carré figure (II.5)  $P_0 - 3 \cdot R_s \cdot I_0^2 = f(V_0^2)$ , en variant la tension d'alimentation de  $V_0$  à la valeur nominale et en connaissant les valeurs  $I_0$  et  $P_0$ , qui peuvent être mesurées respectivement à l'aide d'un ampèremètre et d'un wattmètre.

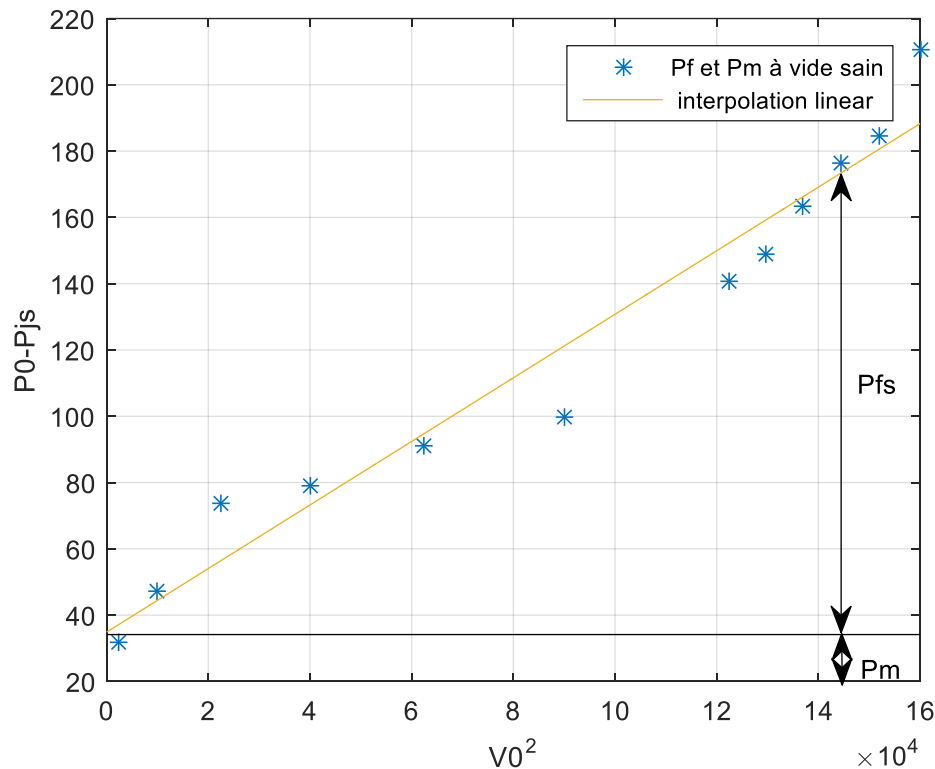


Figure II. 5 Courbe des pertes fer statorique et des pertes mécaniques à vide

La valeur des pertes mécaniques  $P_{mec}$  est obtenue en prolongeant la courbe jusqu'à la tension  $V_0 = 0$ , tandis que les pertes fer sont obtenues si  $V_0 = V_n$ . Pour le fonctionnement nominal, ces pertes sont considérées comme constantes.

A partir de la figure II.5 on peut séparer les pertes fer des pertes mécaniques. Pour une tension de 380V ( $P_{d0}-P_{djs}$ ) vaut 176 [W] sur la droite de proportionnalité.

On peut déduire les pertes fer à partir de cette courbe comme suit :

$$P_0 - P_{js} = P_f + P_m$$

$$P_f = P_0 - P_{js} - P_m$$

$$P_f = 176 - 35$$

$$P_f = 141 [W] .$$

### II.7. Détermination de la résistance $R_m$ et de la réactance $X_m$

L'équation électrique simplifiée qui régit le schéma équivalent à vide qui est présenté dans la (figure II. 3) est donnée par :

$$\bar{V}_s = (R_s + jX_s)\bar{I}_s + \bar{E}_1 \quad (\text{II.11})$$

D'où :

$$\bar{E}_1 = \bar{V}_s - (R_s + jX_s)\bar{I}_s \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$\bar{E}_1 = R_m \bar{I}_h = X_m \bar{I}_u \quad (\text{II.13})$$

Et :

$$I_h = I_0 \cos \varphi_0 \quad (\text{II.14})$$

$$I_u = I_0 \sin \varphi_0 \quad (\text{II.15})$$

Le facteur de puissance à vide :

$$P_0 = 3 \cdot V_s I_s \cdot \cos \varphi_0 \quad (\text{II.16})$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot V_s I_s} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$V_s$  : La tension nominale à vide aux bornes d'un enroulement statorique [V].

$E_1$  : La fem (force électromotrice) induite d'une phase statorique [V].

$I_s$  : Le courant d'une phase statorique [V].

- Expression de la résistance magnétisante  $R_m$

$$P_{fer} = 3 \cdot R_m I_h^2 \quad (\text{II.18})$$

$$E_1 = R_m I_h \quad (\text{II.19})$$

D'où :

$$R_m = \frac{3E_1^2}{P_{fer}} \quad [\Omega] \quad (\text{II.20})$$

- Expression de la réactance magnétisante  $X_m$

$$\bar{E} = jX_m \bar{I}_u \quad (\text{II.21})$$

$$\bar{X}_m = \frac{|\bar{E}_1|}{|\bar{I}_u|} \quad (\text{II.22})$$

D'où :

$$\bar{X}_m = \frac{|\bar{E}_1|}{|\bar{I}_u| \cdot \sin \varphi_0} \quad [\Omega] \quad (\text{II.23})$$

### II.8. Essai à rotor bloqué

Le rotor est bloqué dans cet essai figure (II.6) pour empêcher sa rotation ( $\Omega=0, g=1$ ). Le moteur est alimenté sous une tension réduite afin de ne pas dépasser le courant nominal et les mesures sont effectuées [19] :

- La tension nominale d'alimentation  $V_{cc}$  [V].
- Le courant nominal statorique  $I_{cc}$  [A].
- La puissance nominale absorbée  $P_{cc}$  [W].

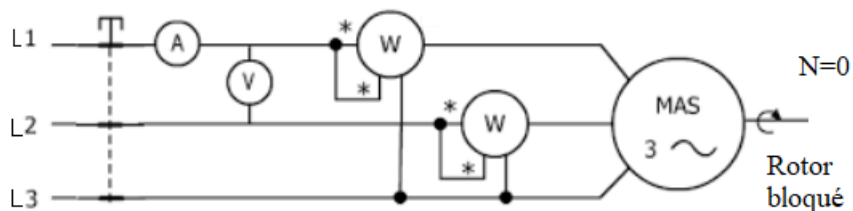


Figure II.6 Circuit de mesure de l'essai à rotor bloqué

Étant donné que le courant absorbé par le moteur est très élevé, l'essai à rotor bloqué, également appelé essai en court-circuit, Le schéma équivalent en court-circuit suivant figure (II.7) montre que le courant magnétisant  $I_m$  est inférieur au courant  $I_{cc}$  :

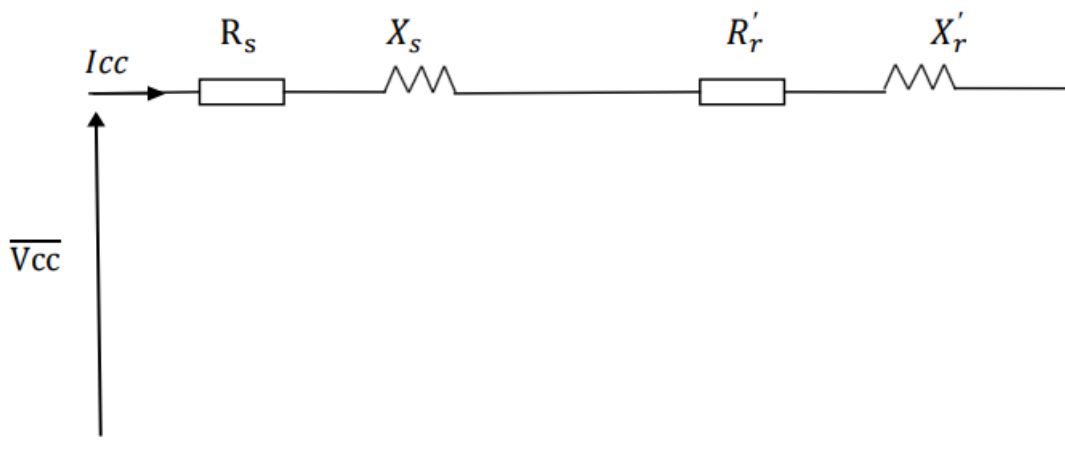


Figure II.7 : Schéma équivalent simplifié de la machine asynchrone à rotor bloqué.

## ❖ Résultats des mesures

Tableau II.3 Résultats de mesure de l'essai à rotor bloqué

$V_{cc}$ (V)	$I_{cc}$ (A)	$P_{cc}$ (W)
30	2	66
43,5	3	142
57	4	244
73	5,2	400

• Expression de la résistance  $R'_r$ 

La somme des pertes par effet Joule est la puissance électrique absorbée par un rotor bloqué. Le stator perd des Joules  $P_{js}$  et le rotor perd des pertes par effet Joule  $P_{jr}$ .

$$P_{CC} = 3 \cdot (R_s + R'_r) I_{CC}^2 \quad (\text{II.24})$$

D'où :

$$R'_r = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} - R_s \quad (\text{II.25})$$

• Expression des réactances de fuites  $X_s$  et  $X'_r$ 

L'impédance vue aux bornes de la tension d'alimentation est :

$$\overline{z_{cc}} = \frac{\overline{V_{cc}}}{I_{cc}} \quad [\Omega] \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$$\overline{z_{cc}} = (R_s + R'_r) + j(X_s + X'_r) \quad (\text{II.27})$$

On notera :

$$R_{cc} = (R_s + R'_r) \quad (\text{II.28})$$

$$X_{cc} = (X_s + X'_r) \quad (\text{II.29})$$

## ✓ Le facteur de puissance en court-circuit

$$P_{CC} = 3 \cdot V_{CC} \cdot I_{CC} \cdot \cos \varphi_{CC} \quad (\text{II.30})$$

D'où :

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot V_{cc} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.31})$$

On peut écrire aussi :

$$R_{cc} = Z_{cc} \cdot \cos \varphi_{cc} \quad (\text{II.32})$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \cdot \sin \varphi_{cc} \quad (\text{II.33})$$

Puisque :

$$z_{cc} = \sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2} \quad (\text{II.34})$$

Donc :

$$X_{cc} = \sqrt{z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \quad (\text{II.35})$$

La réactance de fuite statorique et rotorique sont égales pour les moteurs bobinés et à cage de petite puissance, mais pour les moteurs de grande puissance, ce rapport est différent  $X_s/X_r'$  est donné par le constructeur.

Donc :

$$X_s = X_r' = \frac{1}{2} X_{cc} \quad (\text{II.36})$$

$$X_s = X_r' = \frac{1}{2} \sqrt{Z_{cc}^2 - (R_s + R_r')^2} \quad (\text{II.37})$$

## II.9. Résultats de la Méthode classique

En utilisant les résultats obtenus lors de l'essai à vide et de l'essai en court-circuit, un programme écrit sous MATLAB, nous permet de calculer les paramètres électriques du moteur asynchrone.

Le rapport  $\frac{X_s}{X_r'}$  est donné par le constructeur et lorsqu'il n'est pas disponible comme dans notre cas, on prend  $X_s = X_r'$  pour les moteurs de faible puissance. Les résultats obtenus par la méthode classique pour le moteur que nous avons testé sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau II.4 Les paramètres du schéma électrique équivalent**

$R_r'[\Omega]$	$R_s[\Omega]$	$X_s[\Omega]$	$X_r'[\Omega]$	$X_m[\Omega]$	$R_m[\Omega]$
5.80	8.98	9.64	9.64	205.63	2831.5

## II.10. Méthode itérative

La méthode repose sur le principe d'itération jusqu'à ce que la convergence soit atteinte lorsque les conditions imposées sont satisfaites, c'est-à-dire lorsque les puissances mesurées à vide et en court-circuit sont satisfaites. Les essais utilisés dans cette méthode sont les mêmes que dans la méthode classique, et les expressions itératives des différents paramètres du schéma électrique équivalent sont rassemblées [19].

- **Expression de la puissance réactive**

La puissance apparente absorbée par le moteur à partir du schéma équivalent est :

$$S = (3 \cdot V_s \cdot I_s) = \sqrt{P_s^2 + Q_s^2} \quad (\text{II.38})$$

$$Q_0 = \sqrt{(3 \cdot V_s \cdot I_s)^2 - P_s^2} \quad (\text{II.39})$$

Avec :

$P$  : La puissance active absorbée [W].

$Q_0$  : La puissance réactive absorbée [Var].

$S$  : La puissance apparente absorbée [VA].

### II.10.1. Essai à vide

- **Expression de la réactance magnétisante  $X_m$**

Du schéma équivalent à vide on déduit l'expression de la puissance réactive.

$$Q_0 = 3 \cdot X_s \cdot I_0^2 + 3X_m \cdot I_u^2 \quad (\text{II.40})$$

En appliquant la loi de Kirchhoff au schéma équivalent à vide, on aura :

$$I_u = I_0 \text{ avec } I_h = \mathbf{0} \text{ (à vide)} \quad (\text{II.41})$$

D'où :

$$I_0 = \frac{V_{s0}}{R_s^2 + (X_s + X_m)^2} \quad (\text{II.42})$$

On sait que :

$$R_s \ll X_s + X_m \quad (\text{II.43})$$

Donc :

$$I_0^2 = \frac{V_{s0}}{X_m} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_s}{X_m}\right)} \quad (\text{II.44})$$

$$Q_0 = 3 \cdot X_s \cdot I_0^2 + 3 \cdot \frac{V_{s0}^2}{X_m} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{X_s}{X_m}}\right) \quad (\text{II.45})$$

D'où :

$$X_m = \frac{3 \cdot V_{s0}^2}{Q_0 - 3 \cdot X_s \cdot I_0^2} \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{X_s}{X_m}}\right)^2 \quad [\Omega] \quad (\text{II.46})$$

- **Expression de la résistance magnétisante  $R_m$**

A vide, les pertes fer sont données par l'expression suivante :

$$P_{fs} = P_0 - R_s \cdot I_0^2 - P_m \quad (\text{II.47})$$

Et aussi :

$$P_f = 3 \cdot R_m \cdot I_h^2 \quad (\text{II.48})$$

Avec :

$$I_h = \frac{X_m}{R_m} \cdot I_0 \quad (\text{II.49})$$

D'où :

$$P_f = 3 \cdot R_m \cdot \frac{X_m^2}{R_m^2} \cdot I_0^2 \quad (\text{II.50})$$

$$P_f = \frac{3 \cdot V_{s0}^2}{R_m} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{X_s}{X_m}} \right)^2 \quad (\text{II.51})$$

D'où :

$$R_m = \frac{3 \cdot V_{s0}^2}{P_f} \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{X_s}{X_m}} \right)^2 \quad [\Omega] \quad (\text{II.52})$$

### II.10.2. Essai à rotor bloqué

- **Expression des réactances  $X_s$  et  $X'_r$**

On utilise le schéma équivalent à rotor bloqué en tenant compte de la branche magnétisante.

On obtient l'expression de la puissance réactive suivante :

$$Q_{cc} = 3 \cdot X_s \cdot I_{cc}^2 + 3 \cdot X'_r \cdot I_r'^2 + 3 \cdot X_m \cdot I_u^2 \quad (\text{II.53})$$

$$I_h = I'_u \quad (\text{II.54})$$

Avec :

$Q_{cc}$  : La puissance réactive absorbée à rotor bloqué [VAR].

$$X'_r \cdot I_r' = -X_m \cdot I_m \quad (\text{II.55})$$

$$I_m = -\frac{X'_r}{X_m} \cdot I_r' \quad (\text{II.56})$$

D'où :

$$Q_{CC} = 3 \cdot X_s \cdot I_{cc}^2 + 3 \cdot X_r' \cdot \left(1 + \frac{X_r'}{X_m}\right) \cdot I_r'^2 \quad (\text{II.57})$$

On sait que :

$$\overline{I_{cc}} = \overline{I_m'} - \overline{I_r'} \quad (\text{II.58})$$

$$I_{cc} = -\frac{X_r'}{X_m} \cdot I_r' - I_r' \quad (\text{II.59})$$

$$I_{cc} = -I_r' \cdot \left(1 + \frac{X_r'}{X_m}\right) \quad (\text{II.60})$$

D'où :

$$I_r' = -\frac{1}{\left(1 + \frac{X_r'}{X_m}\right)} \cdot I_{cc} \quad (\text{II.61})$$

On remplace  $I_r'$  dans l'expression de la puissance réactive et on trouve :

$$Q_{CC} = 3 \cdot X_s \cdot I_{cc}^2 + 3 \cdot X_r' \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_r'}{X_m}\right)} \cdot I_{cc}^2 \quad (\text{II.62})$$

$$Q_{CC} \cdot \left(1 + \frac{X_r'}{X_m}\right) = 3 \cdot X_s \cdot \left(1 + \frac{X_r'}{X_m}\right) \cdot I_{cc}^2 + 3 \cdot X_r' \cdot I_{cc}^2 \quad (\text{II.63})$$

$$Q_{CC} \cdot \left(1 + \frac{X_r'}{X_m}\right) = 3 \cdot X_s \cdot \left(1 + \frac{X_r'}{X_m} + \frac{X_r'}{X_s}\right) \cdot I_{cc}^2 \quad (\text{II.64})$$

$$Q_{CC} \cdot \left(\frac{1}{X_r'} + \frac{1}{X_m}\right) = 3 \cdot X_s \cdot \left(\frac{1}{X_r'} + \frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_s}\right) \cdot I_{cc}^2 \quad (\text{II.65})$$

$$Q_{CC} \cdot \left(\frac{X_s}{X_r'} + \frac{X_s}{X_m}\right) = 3 \cdot X_s \cdot \left(\frac{X_s}{X_r'} + \frac{X_s}{X_m} + 1\right) \cdot I_{cc}^2 \quad (\text{II.66})$$

D'où :

$$X_s = \frac{Q_{CC}}{3 \cdot \left(1 + \frac{X_s}{X_r'} + \frac{X_s}{X_m}\right) \cdot I_{cc}^2} \cdot \left(\frac{X_s}{X_r'} + \frac{X_s}{X_m}\right) [\Omega] \quad (\text{II.67})$$

Avec :

$$X_r' = X_s [\Omega] \quad (\text{II.68})$$

- Expression de la résistance rotorique ramenée au stator  $R_r'$

On utilise le schéma équivalent à rotor bloqué en tenant compte de la branche magnétisante.  
On obtient l'expression de la puissance active suivante :

$$P_{cc} = 3 \cdot R_s \cdot I_{cc}^2 + 3 \cdot R_r' \cdot I_r'^2 + 3 \cdot R_m \cdot I_h^2 \quad (\text{II.69})$$

Avec :

$$R_m \cdot I_h = X_m \cdot I_m \quad (\text{II.70})$$

$$X_m \cdot I'_m = -X'_r \cdot I'_r \quad (\text{II.71})$$

$$I_h = \frac{X'_r}{R_m} \cdot I'_r = \frac{X'_r}{R_m} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X'_r}{X_m}\right)} \cdot I_{cc} \quad (\text{II.72})$$

D'où :

$$P_{cc} = 3 \cdot I_{cc}^2 \left( R_s + \frac{X_r'^2}{R_m} \left( \frac{1}{1 + \frac{X'_r}{X_m}} \right)^2 + R'_r \left( \frac{1}{1 + \frac{X'_r}{X_m}} \right)^2 \right) \quad (\text{II.73})$$

$$R'_r = \left( \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_{cc}^2} - R_s \right) \cdot \left( 1 + \frac{X'_r}{X_m} \right)^2 - \left( \frac{X_r'^2}{R_m} \right) \quad [\Omega] \quad (\text{II.74})$$

#### ❖ Les étapes à suivre pour résoudre ces équations par la méthode itérative [4]

En assumant tout au début une valeur pour  $X_s$ , une autre pour  $X_m$ , et on pose  $X'_r = X_s$ .

1. Résoudre l'équation II.46 pour les valeurs initiales de  $X_s$  et  $X_m$ , et on trouvera la nouvelle valeur de  $X_m$ .
2. Résoudre l'équation II.67 pour la valeur initiale de  $X_s$  et la nouvelle valeur  $X_m$  trouvée de l'équation II.46, on aura la nouvelle valeur de  $X_s$  et de  $X'_r$ .
3. Résoudre l'équation II.46 en utilisant les nouvelles valeurs de  $X_s$ ,  $X'_r$  et  $X_m$  trouvées précédemment.
4. Continuer ce calcul itératif jusqu'à avoir une fluctuation des valeurs de  $X_s$  et  $X_m$  d'ordre 0.1%.
5. Connaissant  $X_s$  et  $X_m$  on peut calculer les valeurs de  $R'_r$  et  $R_m$  à partir des équation II.74 II.52 respectivement.
6. Si la fluctuation d'ordre de 0.1% n'est pas obtenue, c'est-à-dire que la boucle itérative s'exécute indéfiniment, c'est que les valeurs initiales de  $X_s$  et de  $X_m$  divergent. Dans ce cas, il faut réinitialiser  $X_s$  et  $X_m$  par des nouvelles valeurs.

### II.11. Résultat de la Méthode itérative

Tableau II.5 Paramètres itératifs

$R'_r$ [ $\Omega$ ]	$R_s$ [ $\Omega$ ]	$X_s$ [ $\Omega$ ]	$X'_r$ [ $\Omega$ ]	$X_m$ [ $\Omega$ ]	$R_m$ [ $\Omega$ ]
6.34	8.98	9.87	9.87	204.52	2795.8

En faisant varier les paramètres par un processus itératif jusqu'à atteindre les puissances actives et réactives mesurées, cette méthode utilise les résultats des essais à vide et à rotor bloqué.

#### ❖ Comparaison des deux méthodes

Pour calculer la différence entre les résultats de la méthode classique avec ceux de la méthode itérative :

$$\text{Différence} = \left| \frac{\text{valeur itérative} - \text{valeur classique}}{\text{valeur itérative}} \right| \cdot 100$$

Cette différence est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.6 Comparaison des deux méthodes

Paramètres	$R'_r$	$X_s$	$X'_r$	$X_m$	$R_m$
Différence [%]	8.42	2.30	2.30	0.52	1.25

D'après les résultats obtenus par le tableau de comparaison, on remarque que la différence entre la méthode classique et itérative pour la majorité des paramètres est faible.

La différence entre  $X_s$  et  $X_r$  est de 2,30%,  $X_m$  de 0,52% et  $R_m$  de 1,25 %. En revanche, la résistance rotorique ramenée  $R'_r$ , qui est d'environ 8,42% par rapport aux autres paramètres, montre une différence significative entre les deux méthodes. Les caractéristiques du moteur obtenues par les deux méthodes théoriques diffèrent légèrement en raison de cette différence. Ce qui permet de les différencier c'est leur comparaison aux résultats expérimentaux. Par conséquent, elle peut fournir des indications sur la précision des deux techniques.

### II.12. Méthode théorique des performances

#### • Expression des différentes impédances

L'expression de l'impédance globale ou l'impédance d'entrée du schéma équivalent est comme suit :

$$\overline{Z}_e = \overline{Z}_1 + \frac{\overline{Z}_2 \cdot \overline{Z}_m}{\overline{Z}_2 + \overline{Z}_m} \quad (\text{II.75})$$

Avec :

$\overline{Z}_1 = R_s + jX_s$  : Impédance d'une phase d'enroulement du stator [ $\Omega$ ].

$\overline{Z}_2 = \frac{R'_r}{g} + jX'_r$  : Impédance d'une phase d'enroulement rotorique ramené au stator [ $\Omega$ ].

$\overline{Z}_m = \frac{R_m \cdot jX_m}{R_m + jX_m}$  : Impédance équivalente de la branche magnétique [ $\Omega$ ].

- **Expression du courant primaire**

$$\overline{I}_s = \frac{\overline{V}_s}{\overline{Z}_e} = \frac{\overline{V}_s}{\overline{Z}_1 + \frac{\overline{Z}_2 \cdot \overline{Z}_m}{\overline{Z}_2 + \overline{Z}_m}} \quad [\text{A}] \quad (\text{II.76})$$

- **Expression du courant secondaire ramené au stator**

On applique le diviseur de courant, on trouve :

$$I'_r = \frac{\overline{Z}_m}{\overline{Z}_2 + \overline{Z}_m} \cdot \overline{I}_s \quad [\text{A}] \quad (\text{II.77})$$

On remplace  $\overline{I}_s$  par son expression, on trouve :

$$I'_r = \frac{\overline{Z}_m}{(\overline{Z}_2 + \overline{Z}_m) \cdot \left( \overline{Z}_1 + \frac{\overline{Z}_2 \cdot \overline{Z}_m}{\overline{Z}_2 + \overline{Z}_m} \right)} \cdot \overline{V}_s \quad [\text{A}] \quad (\text{II.78})$$

- **Expression du courant magnétisant**

$$\overline{I}_m = \frac{\overline{Z}_2}{(\overline{Z}_2 + \overline{Z}_m) \cdot \left( \overline{Z}_1 + \frac{\overline{Z}_2 \cdot \overline{Z}_m}{\overline{Z}_2 + \overline{Z}_m} \right)} \cdot \overline{V}_s \quad [\text{A}] \quad (\text{II.79})$$

- **Expression du facteur de puissance**

On sait que :

$$\overline{Z}_e = \Re(Z_e) + j\Im(Z_e) \quad (\text{II.80})$$

$$\overline{Z}_e = \frac{\overline{V}_s}{\overline{I}_s} \quad (\text{II.81})$$

D'où :

$$|\overline{Z}_e| = \frac{|\overline{V}_s|}{|\overline{I}_s|} \quad (\text{II.82})$$

$$\cos \varphi = \frac{\Re(z_e)}{|\overline{z}_e|} \quad (\text{II.83})$$

Donc :

$$\cos \varphi = \frac{\Re(z_e) \cdot |\overline{I}_s|}{|\overline{V}_s|} \quad (\text{II.84})$$

Avec :

$\mathcal{R}$  : Est la partie réelle de l'impédance  $Z_e$ .

$\mathcal{J}$  : Est la partie imaginaire de l'impédance  $Z_e$ .

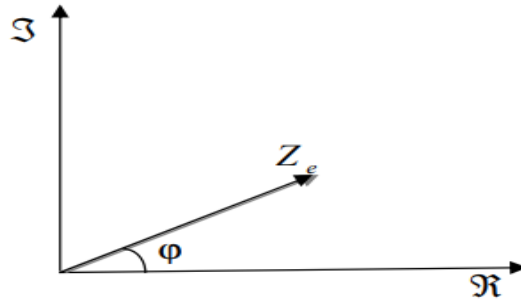


Figure II-8 Présentation trigonométrique de l'impédance  $Z_e$  .

➤ Expression des différentes puissances

- Expression de la puissance absorbée

$$P_a = 3 \cdot V_s \cdot I_s \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (\text{II.85})$$

- Expression de la puissance transmise au rotor

$$P_{tr} = P_a - P_{js} - P_{fs} \text{ [W]} \quad (\text{II.86})$$

- Expression de la puissance utile

$$P_u = P_a - (P_{js} + P_{jr} + P_{fr} + P_{mec}) \text{ [W]} \quad (\text{II.87})$$

$$P_u = P_a - (3 \cdot R_s \cdot I_s^2 + 3 \cdot R'_r \cdot I_r'^2 + P_{fe_r} + P_{mec}) \text{ [W]} \quad (\text{II.88})$$

- Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_s} \text{ [Nm]} \quad (\text{II.89})$$

- Expression du couple utile

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} \text{ [Nm]} \quad (\text{II.90})$$

- Expression de rendement

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (\text{II.91})$$

### II.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une estimation des paramètres électriques et performance d'un moteur asynchrone en exploitant le circuit électrique équivalent simplifier à l'aide de la méthode classique et la méthode itérative.

Les deux méthodes utilisent deux essais (un essai à vide et un essai à rotor bloqué) pour identifier les paramètres électriques de la machine asynchrone et utilisent le même schéma équivalent, le schéma en T ramené au stator et cela par rapport à sa simplicité et sa précision.

La méthode itérative utilise une approche itérative pour satisfaire les puissances mesurées à vide et en court-circuit, tandis que la méthode classique utilise la résolution analytique des équations obtenues du schéma équivalent. Il faut comparer les résultats des performances obtenus par les deux méthodes à ceux obtenus expérimentalement pour déterminer laquelle des deux méthodes donne les meilleurs résultats. C'est ce que nous verrons dans le prochain chapitre.

**Chapitre III :**  
**Estimation des pertes**  
**d'un moteur**  
**asynchrone avec un**  
**défaut de coupure**  
**d'une phase**  
**d'alimentation**

### **III.1 Introduction**

Ce chapitre présente une étude comparative des performances et des pertes calculées de moteur à induction défectueux, et non défectueux, en comparant les résultats théoriques obtenus avec les mesures expérimentales.

Tout d'abord, nous vérifions les paramètres électriques du schéma électrique équivalent du moteur asynchrone (déterminés dans le chapitre II) en comparant les caractéristiques théoriques avec les performances expérimentales. Après validation, ils seront utilisés pour estimer les pertes en présence de rupture d'une phase d'alimentation.

Dans ce qui suit, nous allons présenter la machine asynchrone étudiée, le banc d'essai, suivi de présentation et d'interprétation des différents résultats des essais effectués et réalisés au sein du laboratoire de machine électrique à courant alternatif du département d'électrotechnique (Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).

### **III.2 Présentation du moteur étudié**

Le moteur qui fait l'objet des différents essais, est un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil ayant les caractéristiques suivantes :

- Type 890-100-1064-0041.
- Marque ENEL (électro-industrie) N°22-128-02.
- Puissance 2,2 kW.
- Tension nominale de 380V.
- Courant nominal de valeur 5,2A en triangle.
- Vitesse de rotation de 1410 tr/min.
- Coefficient de puissance  $\cos(\varphi) = 0,83$ .
- Classe d'isolation F (155°C).

### **III.3 Description du banc d'essai**

Le matériel utilisé pour effectuer l'essai sur la machine asynchrone est le suivant :

- ❖ Le banc d'essai comprend la machine décrite ci-dessus entraînant une génératrice à courant continu à excitation séparée. Elle possède les caractéristiques suivantes :
  - Type DL2062
  - Puissance nominale 2.4kW
  - Tension nominale 220V
  - Courant nominale 10.9A
  - Vitesse nominale 1420tr/min
  - Courant d'excitation nominale 1.6A
  - Classe d'isolation (F)
  - Une source d'alimentation triphasé fixe 380V/20A, et variable 0-400V/3,4A en alternatif et une source de tension variable continue.
  - Rhéostat de champ.

- ❖ Différents appareils de mesures :
  - Ampèremètres, Voltmètres, Wattmètres
  - Tachymètre, (Thermomètre et balance pour mesurer le couple).
  - Des capteurs de température.
  - Un multimètre pour mesurer la température
  - Une charge résistive variable.
  - Des fils électriques de câblage.

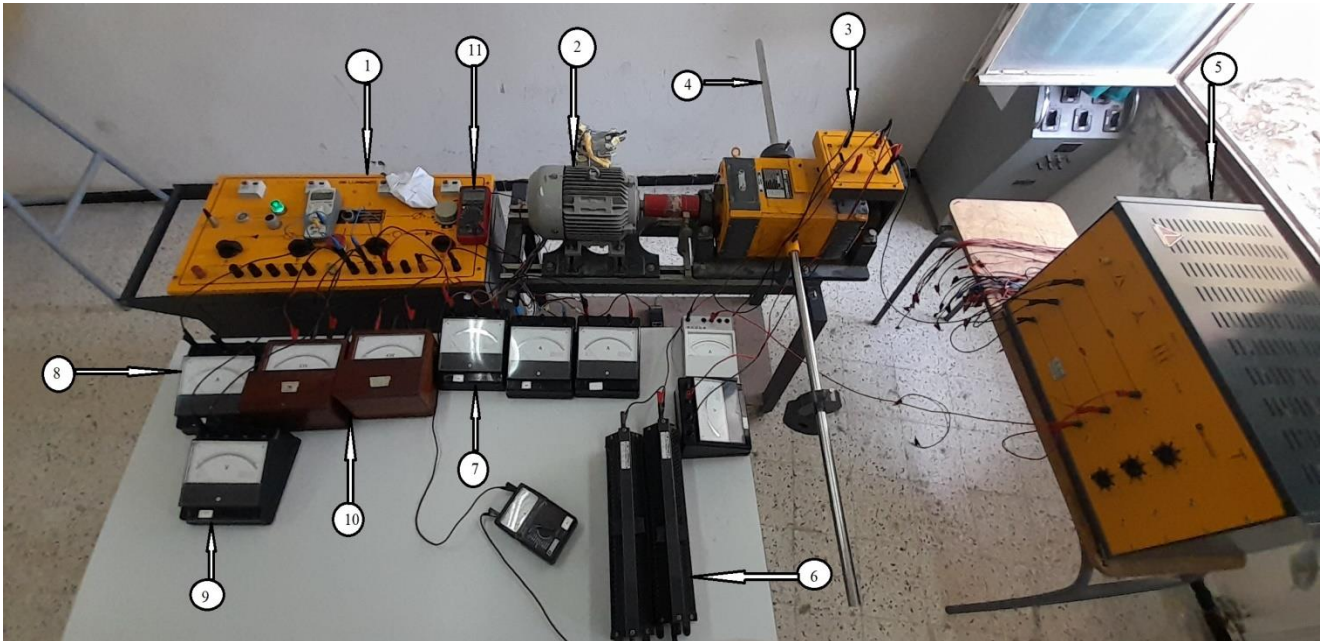


Figure III.1 Dispositif Expérimental utilisé

- 1- Source d'alimentation sinusoïdale.
- 2- Moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil.
- 3- Génératrice à courant continu à excitation séparée.
- 4- Balance pour mesurer le couple.
- 5- Charge résistive.
- 6- Rhéostat de champ.
- 7, 8- Ampèremètres.
- 9- Voltmètre.
- 10- Wattmètres.
- 11- Multimètre pour la mesure de la température.

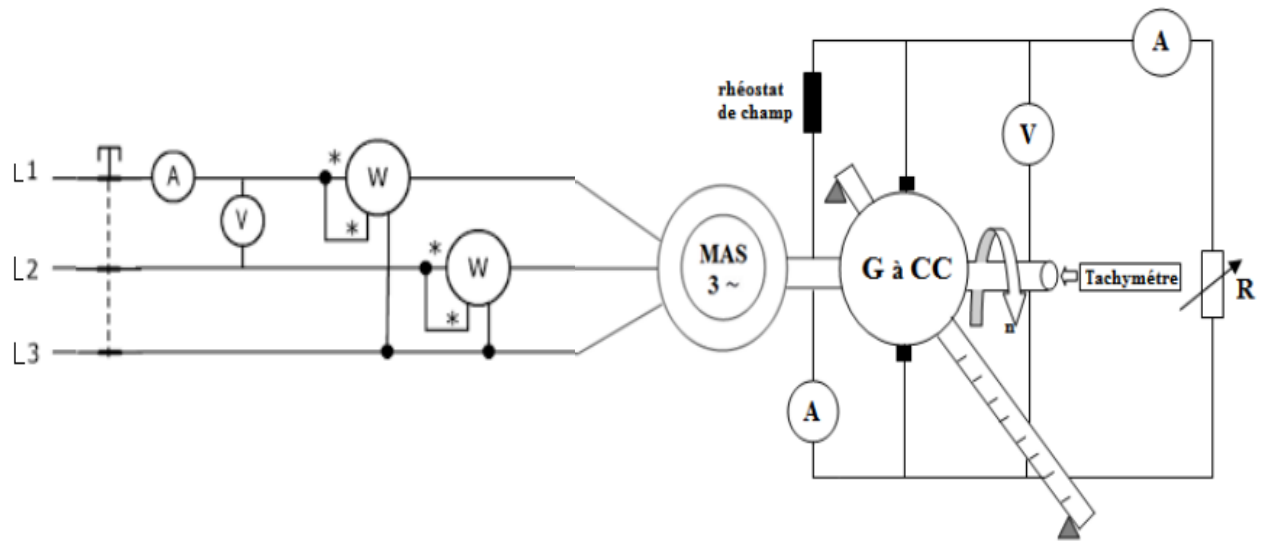


Figure III.2 Circuit de mesure de l'essai en charge

### III.4 Essai en charge

L'essai en charge comprend le moteur asynchrone cité ci-dessus couplé à une génératrice à courant continu débitant sur une résistance variable.

### III.5 Manipulation

Dans cette manipulation, le moteur asynchrone est alimenté sous sa tension nominale (couplage triangle). Ensuite, des résistances sont utilisées comme charge variable alimentées par une génératrice à courant continu.

Pour chaque charge, les mesures suivantes sont relevées :

- Le courant  $I$  absorbé par le moteur asynchrone [A].
- La tension entre phase  $U$  du moteur [V].
- La puissance absorbée  $P_{ab}$  [W].
- La vitesse  $N$  [tr/min].
- La distance  $d$  du bras de la balance avec une masse de 50 N.
- La température de l'enroulement au régime établi.

### III.6 Résultats de mesure de l'essai en charge

Les résultats relatifs à l'essai en charge à température ambiante  $T_{amb}=23^{\circ}\text{C}$  sont donnés dans le tableau suivant :

**Tableau III.1 Résultats de mesure de l'essai en charge en alimentation sinusoïdale**

<b>Le courant simple Absorbé (A)</b>	<b>La puissance absorbée(W)</b>	<b>Le glissement</b>	<b>d (Cm)</b>	<b>La vitesse de rotation (tr/min)</b>	<b>T (°C) Tête de bobine</b>
1.801	386	0.006	0.5	1499	40.5
1.902	700	0.01	5.0	1491	45
2.003	975	0.016	5.4	1483	48
2.130	1210	0.022	12.6	1476	49.3
2.260	1500	0.028	15.7	1468	51
2.450	1800	0.03	19.1	1460	53.4
2.591	2050	0.04	21.8	1454	56.6
2.6713	2200	0.05	24.4	1450	57
2.7868	2370	0.06	26.5	1445	60.5
3.0022	2546	0.07	28.4	1439	64.6
3.1754	2800	0.08	31.4	1432	67.4

Pour déterminer les autres paramètres électriques et performances pratiques tels que le couple utile, les pertes Joule statoriques et rotoriques, le rendement et la puissance transmise, nous avons utilisé les équations du bilan de puissance du chapitre I page 10, 11 et 12.

### **III.7 Validation des paramètres du schéma équivalent en T**

#### **III.7.1 Présentation des caractéristiques de fonctionnement de la machine, méthode classique, méthode itérative et expérimentale**

Les figure.III.3, III.4, III.5, III.6, III.7, III.8, III.9, III.10, III.11 représentent respectivement les caractéristiques de fonctionnement du moteur asynchrone, théoriques (méthode classique et itérative) et expérimentale des courbes des pertes Joule statorique et rotorique en fonction du glissement, de la vitesse de rotation en fonction du couple utile, du courant absorbé, de la puissance absorbée, de la puissance utile, du facteur de puissance, du rendement, du couple utile et de la puissance électromagnétique en fonction du glissement.

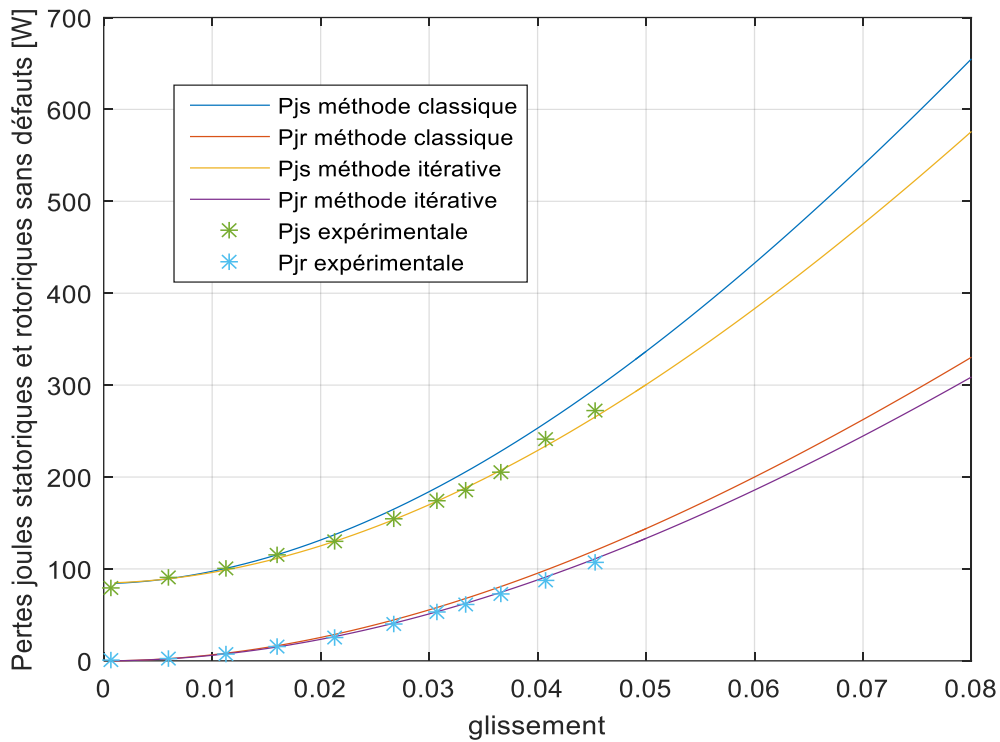


Fig.III.3 Evolution des Pertes Joule statorique et rotorique sans défauts en fonction du glissement

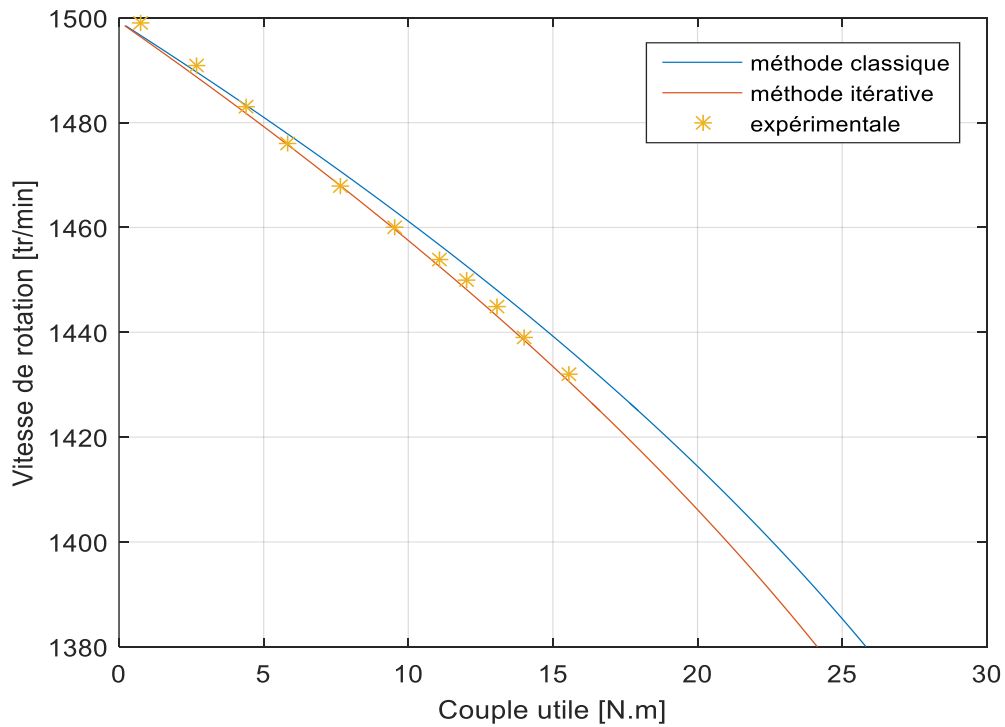


Figure III.4 Evolution de la vitesse de rotation en fonction du couple utile

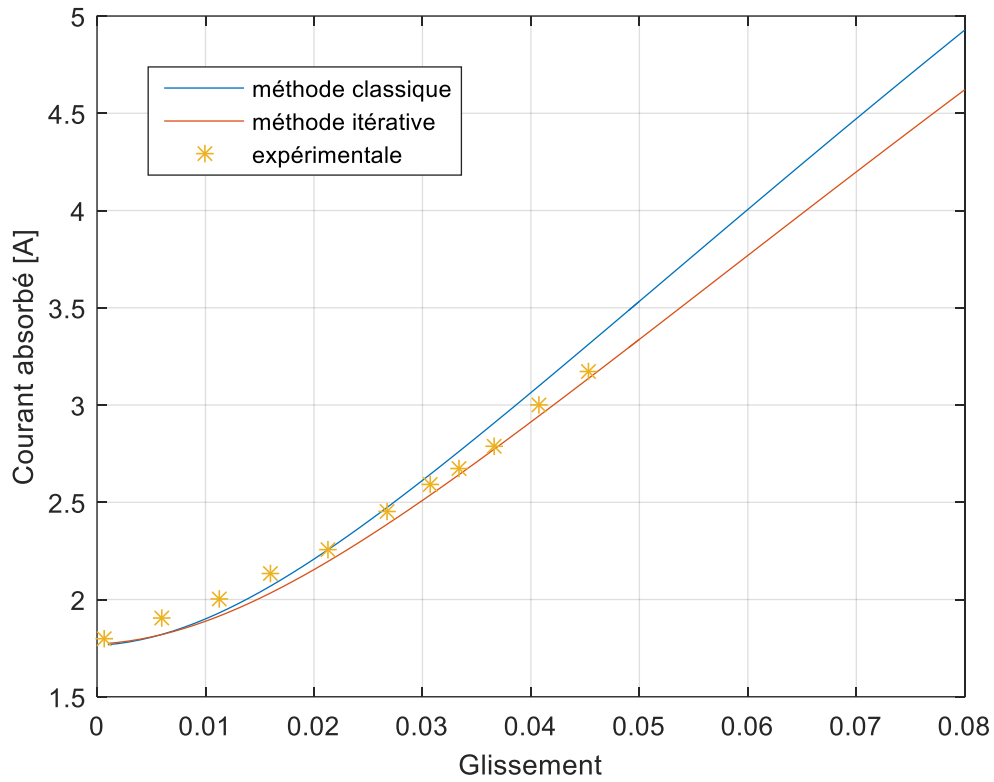


Figure III.5 Evolution du courant absorbé en fonction du glissement

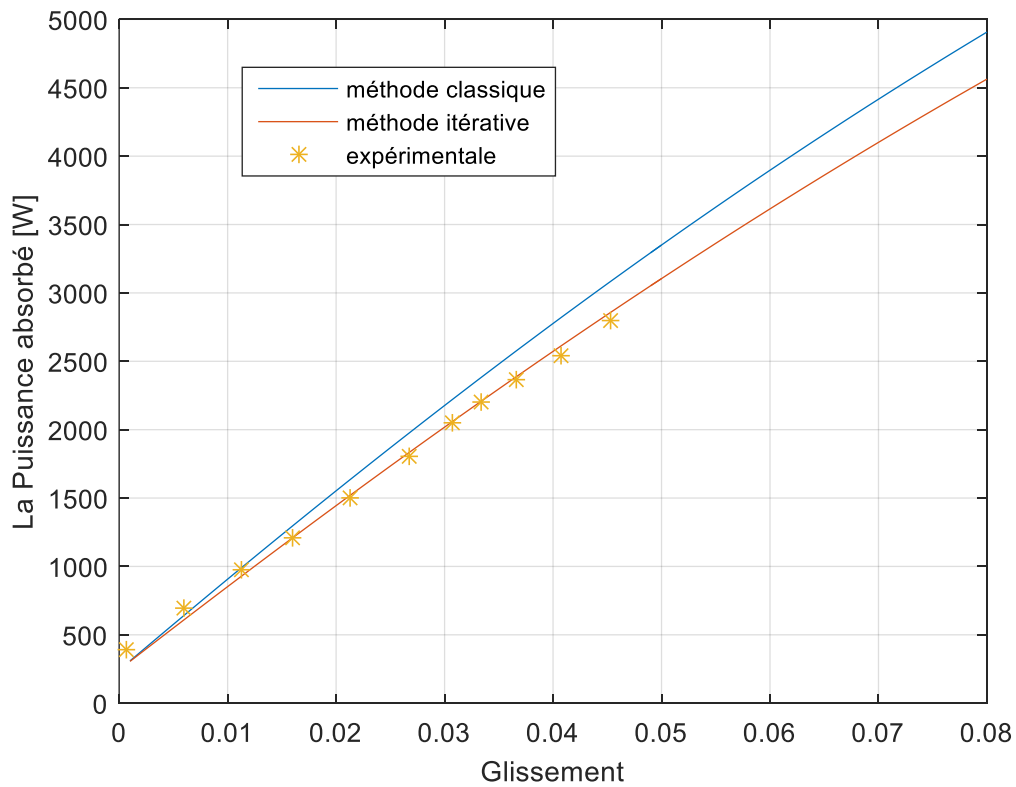


Figure III.6 Evolution de la puissance absorbée en fonction du glissement

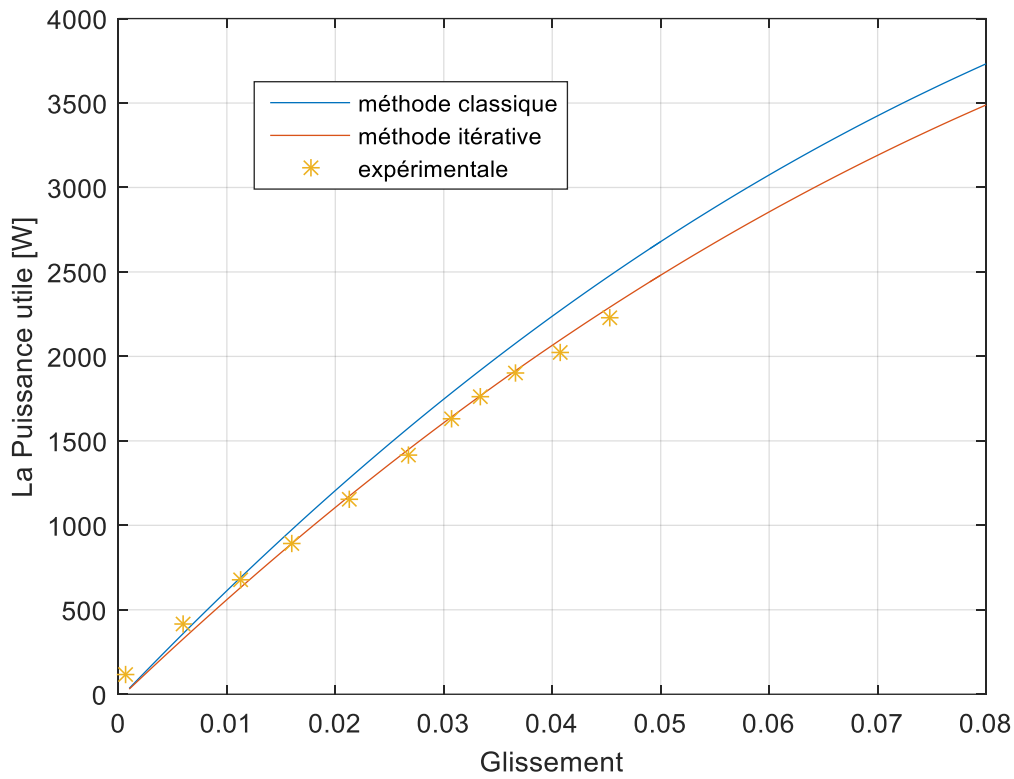


Figure III.7 Allure de la puissance utile en fonction du glissement

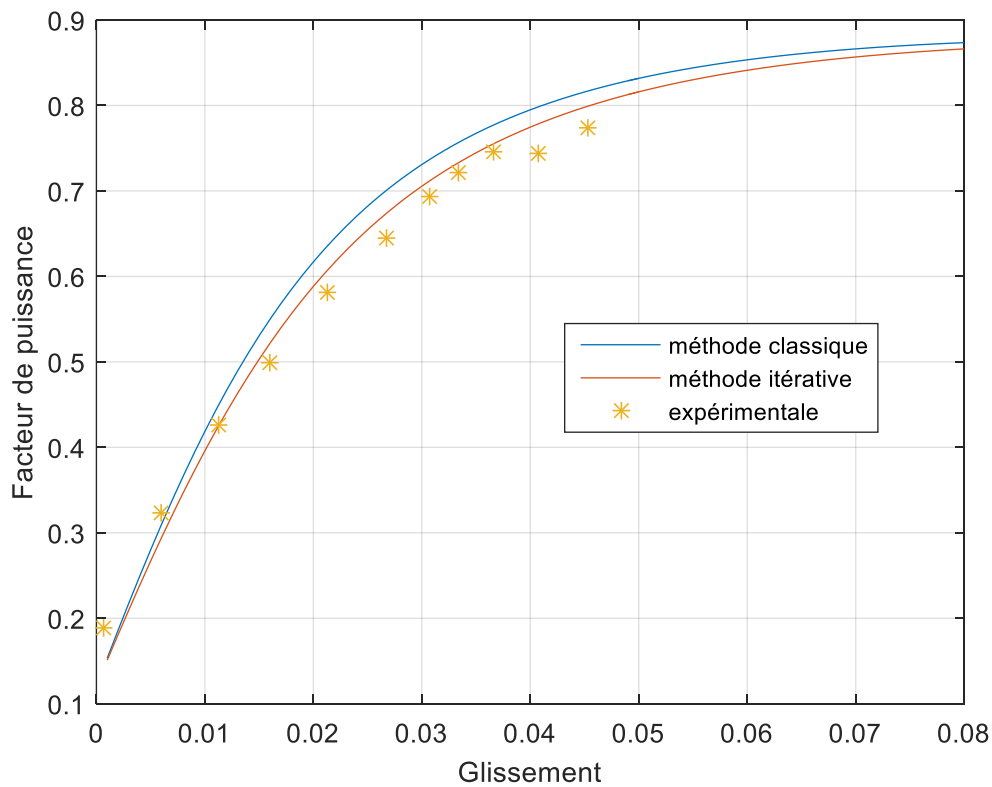


Figure III.8 Evolution du facteur de puissance en fonction du glissement

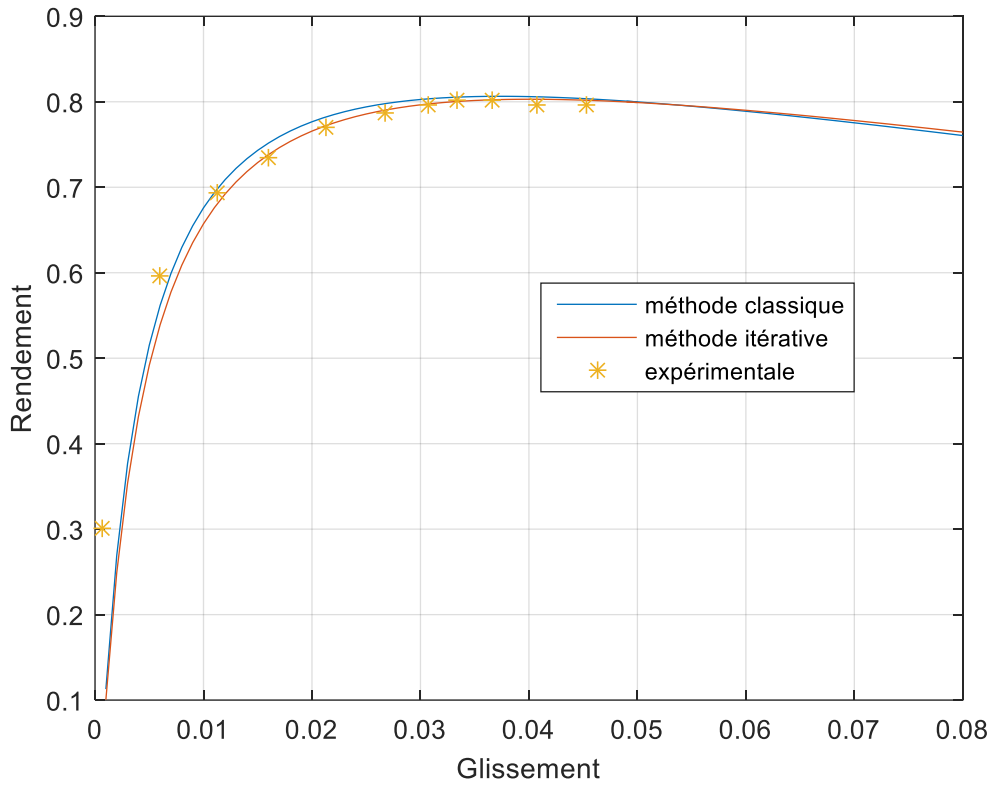


Figure III.9 Evolution du rendement en fonction de glissement

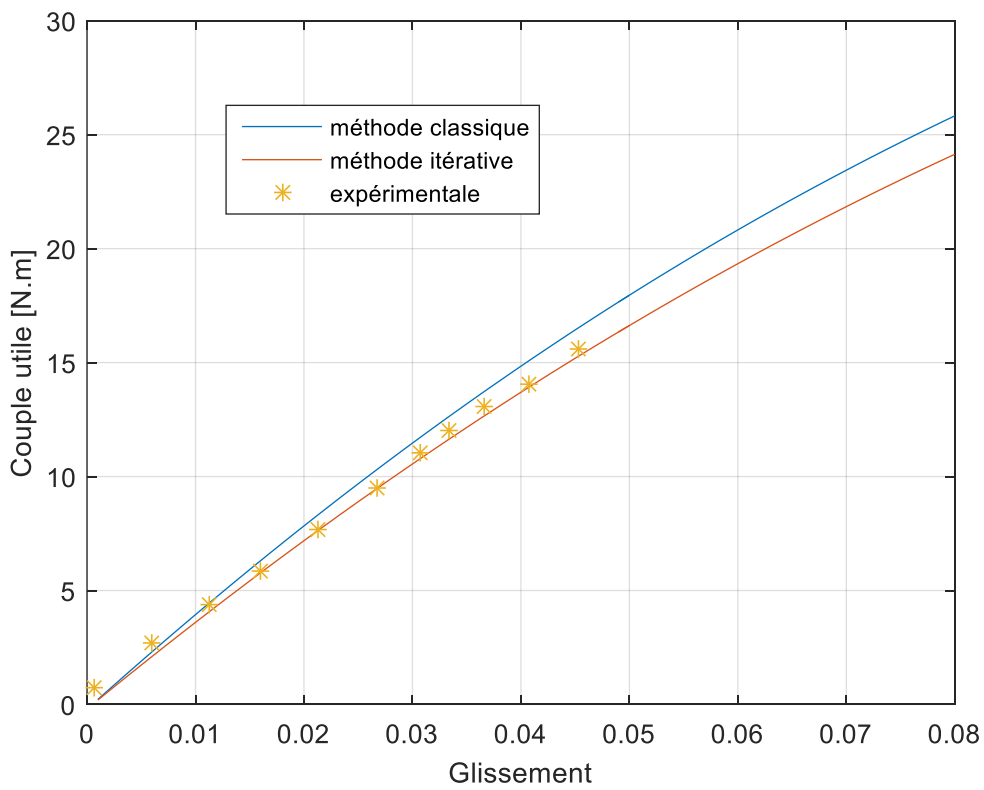


Figure III.10 Evolution du couple utile en fonction de glissement

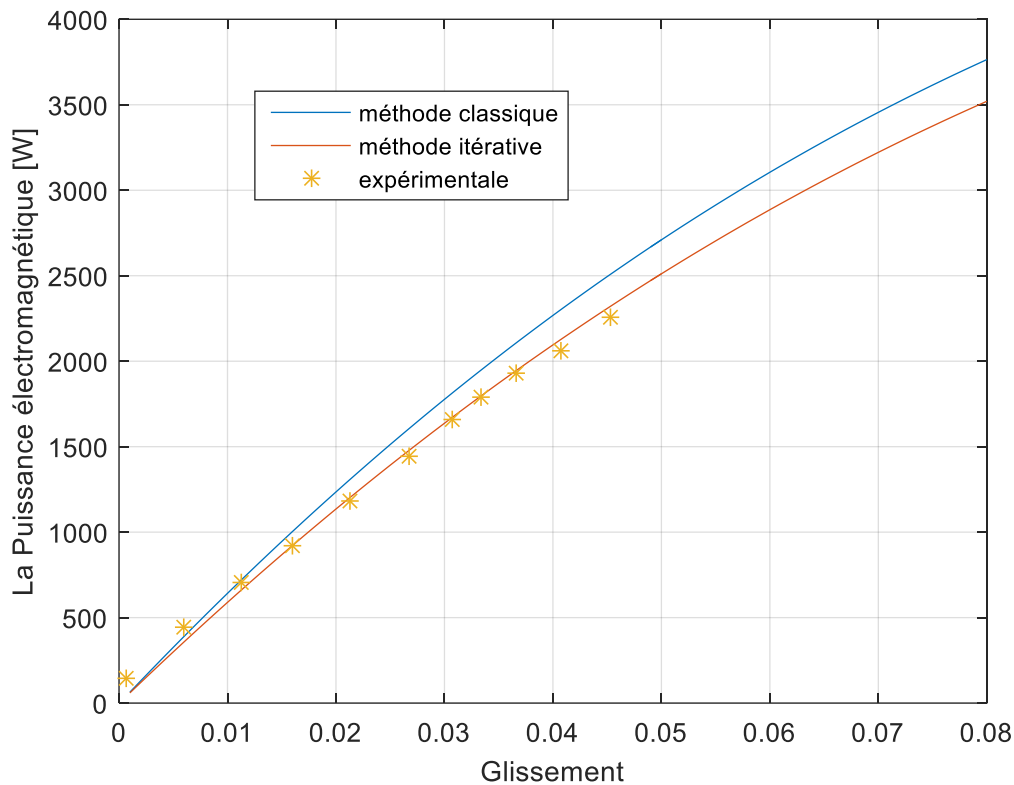


Figure III.11 Evolution de la puissance électromagnétique en fonction du glissement

### III.7.2 Discussion des résultats

La comparaison des résultats des performances du moteur obtenus avec les deux méthodes itératives et classiques et des résultats expérimentaux montre qu'ils sont en bon accord. Les différences entre les résultats obtenus avec ces différentes méthodes ne sont pas très grandes, ce qui conforte la fiabilité des deux méthodes théoriques. L'approche itérative est plus proche du modèle réel du moteur que la méthode traditionnelle.

On constate que les propriétés expérimentales sont proches de celles obtenues par la méthode itérative.

Donc les paramètres électriques estimés par la méthode itérative particulièrement la résistance rotorique ramenée au stator est très proche du modèle réel du moteur et sa valeur déterminée par cette méthode est très satisfaisante pour le fonctionnement nominal.

### III.9 Pertes du moteur asynchrone en présence d'un défaut de coupure d'une phase

Dans cette partie on étudie les pertes du moteur asynchrone à cage d'écureuil de 2,2 kW en charge et en présence d'un défaut de coupure d'une phase d'alimentation.

On alimente le moteur asynchrone couplé en triangle avec un réseau triphasé de 380 V à vide en insérant dans chaque phase et sur une ligne un ampèremètre (figure ci-dessous).

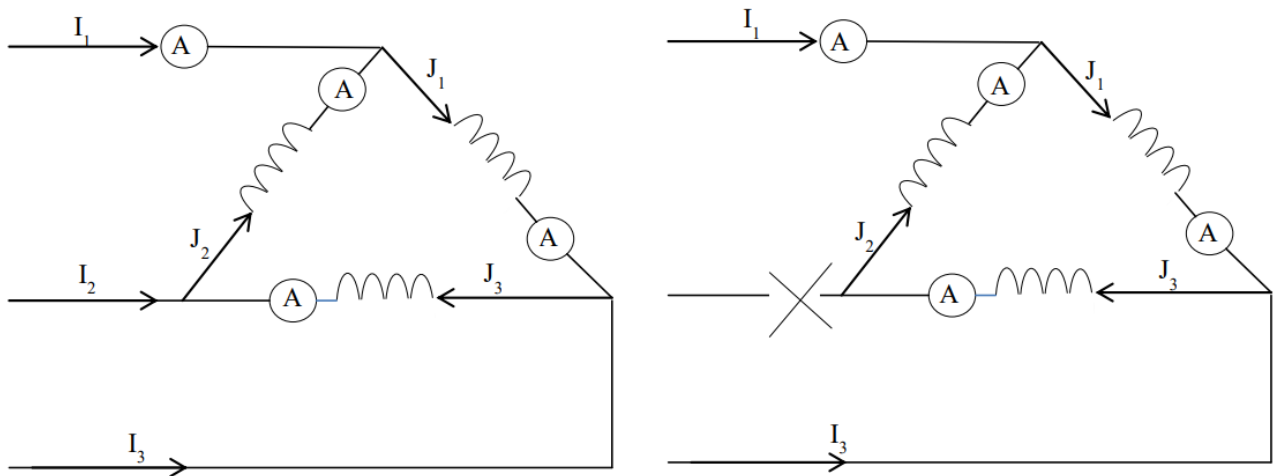


Figure III.12 Schémas du défaut de coupure d'une phase

Ensuite, on ouvre une ligne du réseau et on obtient les résultats suivants :

Tableau III.2 : Courants à vide en mode sain et avec défaut

	Mode sain	Mode de défaut
$I_1(A)$	3.6	4.9
$J_1(A)$	2.3	3.3
$J_2(A)$	2.2	2
$J_3(A)$	2.2	1.8

### III.10 Calcul de la variation des courants de défaut par rapport aux courants du mode sain

D'après le tableau de mesure, on constate une augmentation du courant dans une phase en mode de défaut de 48% de celui du mode sain et une diminution de 14.8% dans les deux autres phases en série.

Par la suite, pour déduire les courants de défauts en charge, il suffit d'appliquer ces pourcentages dans les phases correspondantes.

### III.11. Essai à vide avec défaut

On refait l'essai à vide en mode sain, mais dans cet essai on applique une coupure de phase de l'alimentation pour avoir la valeur des pertes fer en mode de défaut, contrairement aux pertes mécaniques qui sont constants pour les deux essais.

On relève donc les mesures suivantes :

- Puissance active  $P_0$ .
- Le courant absorbé  $I_0$ .
- La vitesse de rotation  $N$ .

Cet essai est fait avec entrainement, et à une température ambiante de 24.5°C.

❖ **Résultat de mesure**

Les résultats de mesures sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau II.3 Résultats de mesure de l'essai à vide avec entrainement avec coupure de phase**

$Vd0$ (V)	$Id0$ (A)	$Pd0$ (W)	$N(tr/min)$	$Td1$ (°C)	$Rd1$ ( $\Omega$ )	$Td2$ (°C)	$Rd2$ ( $\Omega$ )
66	1.05	40	1446	27.4	8,4231	25	8.3461
100	1.05	60	1478	29.7	8,4969	25	8.3461
150	1.425	70	1490	29.5	8,4905	26	8.3782
200	1.9	100	1493	29.3	8,4841	26.1	8.3814
250	2.4	120	1495	36	8,6992	26.3	8.3878
300	3	170	1495	37.5	8,7473	26.6	8.3974
350	4	250	1495	41.3	8,8693	27.2	8.4167
360	4.25	280	1495	43.5	8,9399	27.7	8.4327
370	4.55	310	1495	46.2	9,0266	27.9	8.4391
380	5	360	1496	49.5	9,1325	28.4	8.4552
390	5.35	400	1496	52.4	9,2256	28.6	8.4616
400	5.75	440	1496	55.3	9,3187	28.9	8.4712

**Td1, Rd1** : la température et la résistance respectivement de la phase seule en défaut.

**Td2, Rd2** : la température et la résistance respectivement pour les deux phases en série.

### III.11.1 Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques avec défaut

On trace la courbe des (pertes fer + les pertes mécanique) en fonction de la tension d'alimentation au carré figure (III.5)  $P_{d0} - (R_{sd1}I_{d01}^2 + 2R_{sd2}I_{d02}^2) = f(V_{d0}^2)$ , en variant la tension d'alimentation de  $V_0$  à la valeur nominale et en connaissant les valeurs  $I_0$  et  $P_0$ , mesurées respectivement à l'aide d'un ampèremètre et d'un wattmètre.

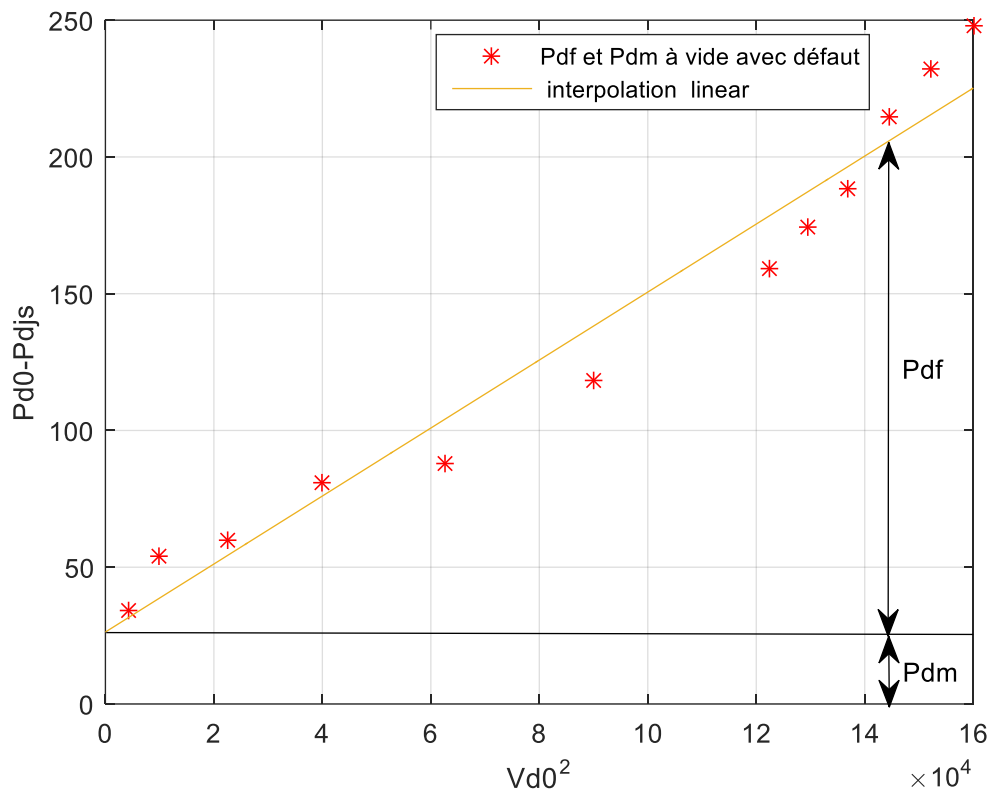


Figure III.13 Courbe des pertes fer et des pertes mécaniques à vide avec défaut

On peut déduire les pertes fer à partir de cette courbe comme suit :

A partir de la figure III.2 on peut séparer les pertes fer des pertes mécaniques. Pour une tension de 380 v ( $P_{d0} - P_{djs}$ ) vaut 206 [W] sur la droite de proportionnalité.

$$P_{d0} - P_{djs} = P_{df} + P_{dm}$$

$$P_{df} = P_{d0} - P_{djs} - P_{dm}$$

$$P_{df} = 206 - 35$$

$$P_{df} = 171 \text{ [W]}.$$

### III.12 Résultats de simulation et comparaison

Les résultats des pertes en fonction de la charge (du glissement), ainsi que les courants obtenus par la simulation sont comparés aux résultats expérimentaux (en charge sain), et en régime de défaut.

Les résultats expérimentaux avec défaut sont déduits de ceux du régime sain en extrapolant ceux du défaut à vide.

Les figures III.14, III15, III16, III17 représentent les courants et les pertes statoriques, avec et sans défauts en fonction du glissement.

Les figures III.18, III19, III20 représentent les courants et les pertes rotoriques avec et sans défaut en fonction du glissement.

Les figures III.21, III22, III23, III24, représentent les courants magnétisants et les pertes fer en fonction du glissement.

Enfin, les figures III25, III26, III27, III28, III29, III30, III31 représentent respectivement la puissance absorbée et le rendement, le facteur de puissance, la puissance utile et le couple utile, la puissance transmise avec et sans défaut théorique et expérimentale en fonction du glissement, la vitesse de rotation en fonction du couple utile.

#### A – Courbes des courants et pertes statorique avec et sans défaut

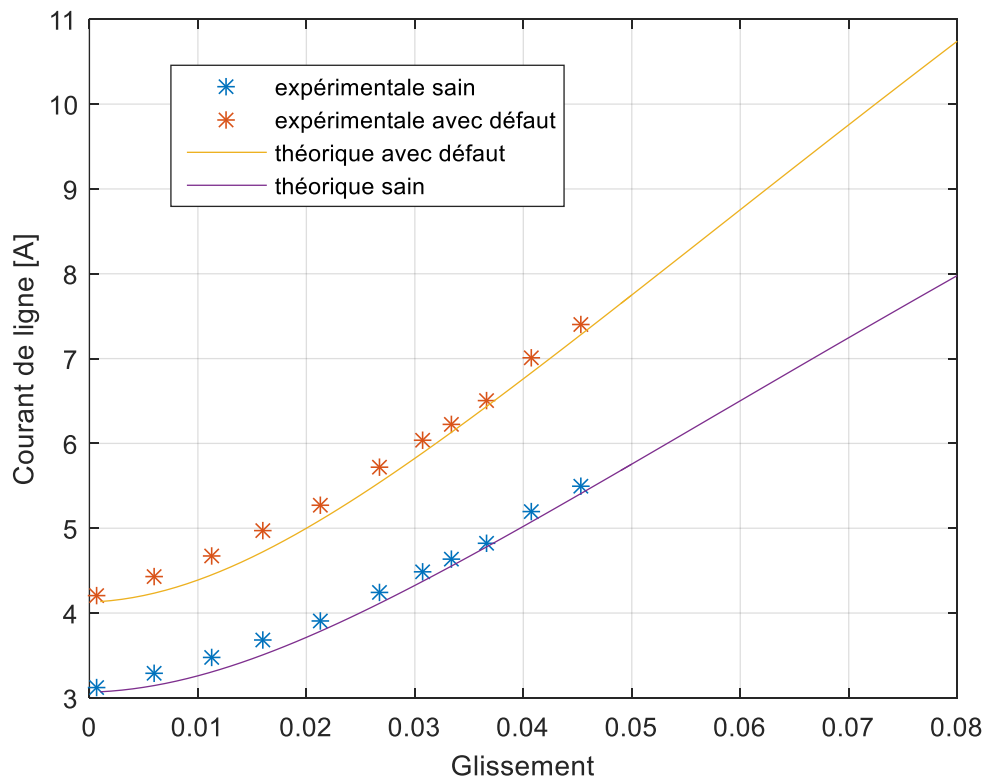


Figure III.14 Evolution du Courant Composé expérimentale et théorique avec et sans défaut

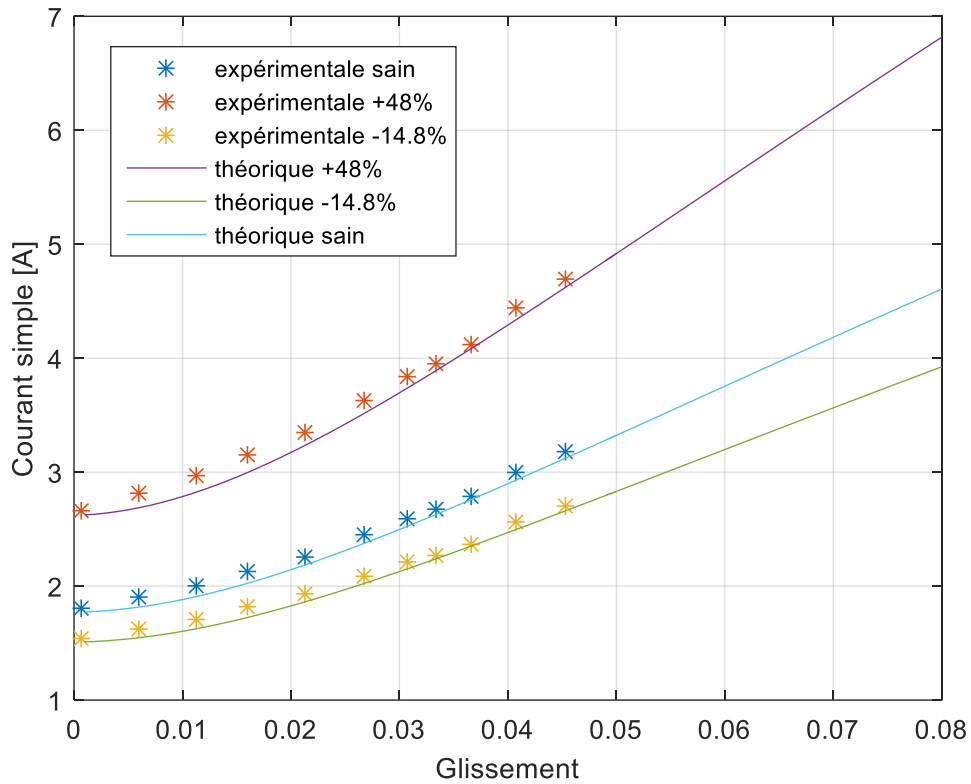


Figure III.15 Evolution du Courant Simple expérimentale et théorique avec et sans défaut

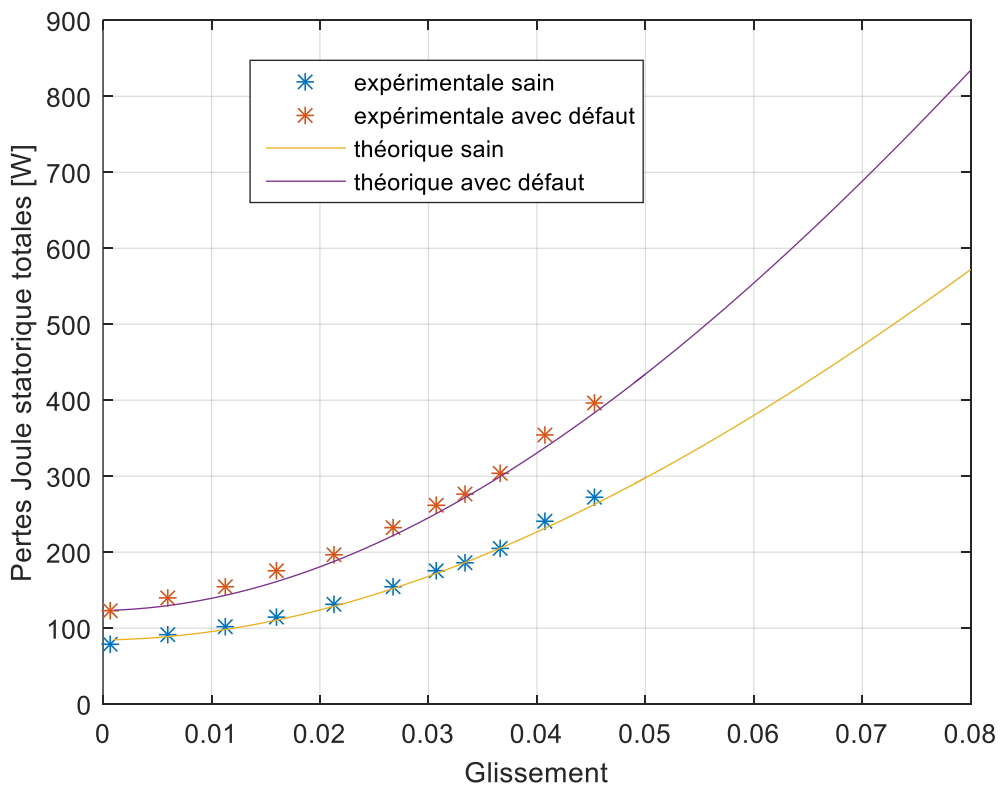
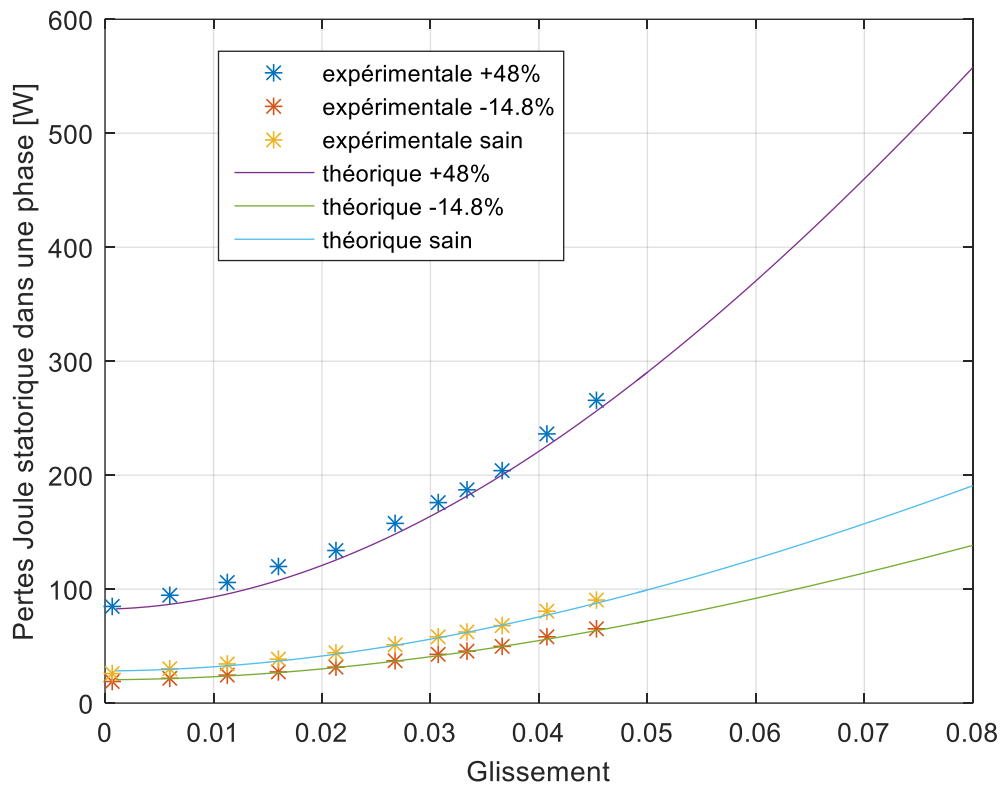


Figure III.16 Evolution des Pertes Joule statoriques totales expérimentales et théoriques avec et sans défaut



**Figure III.17 Evolution des pertes Joule statoriques dans une seule phase expérimentales et théoriques avec et sans défaut**

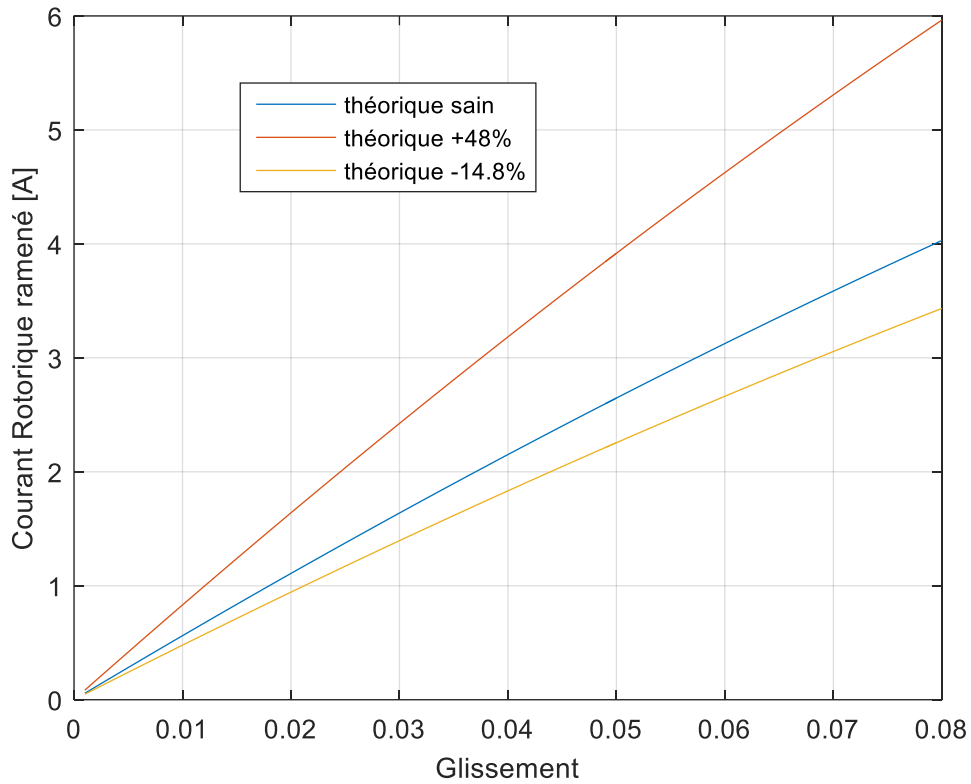
### III.13 Observations et commentaires

La figure III.14 et III.15 montre l'évolution des courants absorbés et les courants simples en fonction du glissement. On remarque que les courants augmentent avec l'augmentation du glissement, ainsi qu'un écart entre les courants. On constate aussi que le courant composé avec défaut est assez important puisqu'il augmente de 34.5% par rapport au courant sans défaut.

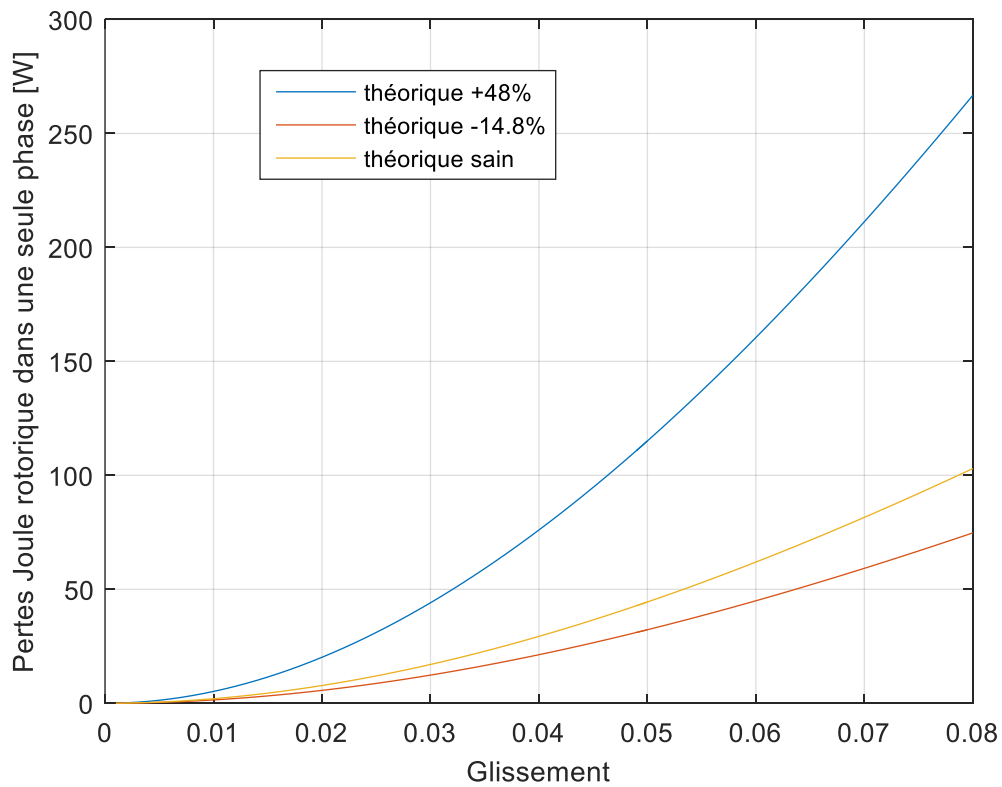
La figure III.16 montre les pertes Joule statorique expérimentales et théoriques totales avec et sans défaut qui augmentent avec l'augmentation du glissement, avec un nette écart qui atteint 48% au régime nominal. On constate que ces pertes sont nettement plus importantes en présence de défaut similaire.

La figure III.17 montre les courbes des pertes Joule statorique dans une phase, elles augmentent avec l'augmentation du glissement, ainsi un écart entre les résultats expérimentaux et calculés. On constate une nette augmentation dans une phase en présence de défaut.

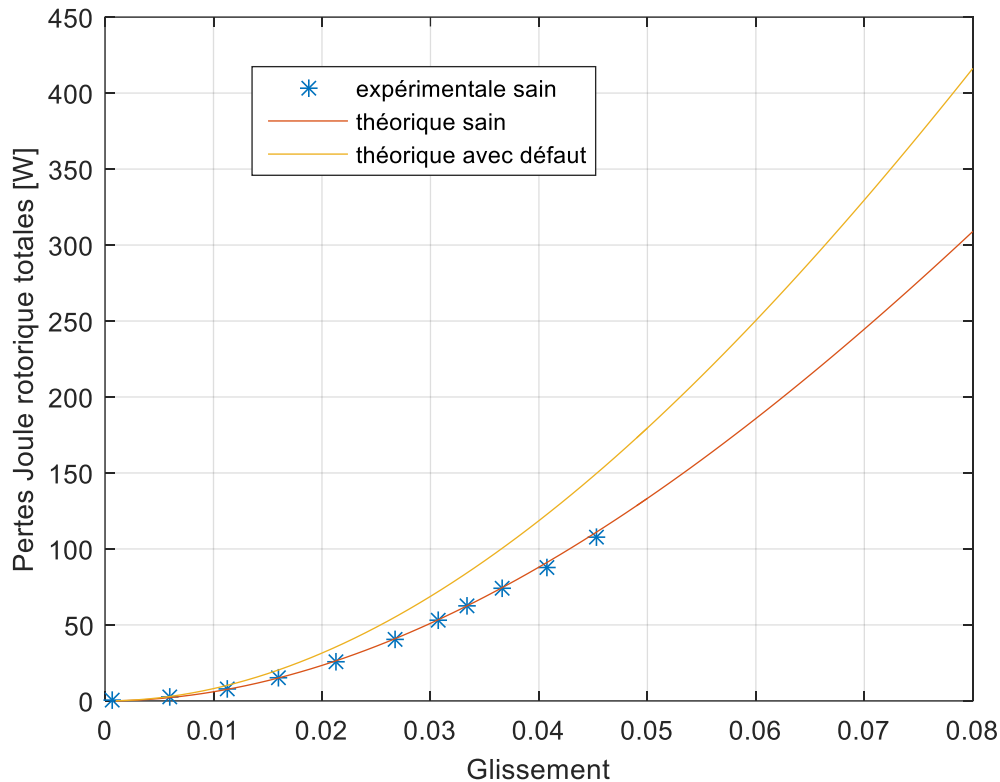
**B-Courbes des courants et des pertes rotoriques avec et sans défaut**



**Figure III.18 Evolution des courants rotoriques ramenés théoriques avec et sans défaut**



**Figure III.19 Evolution des Pertes Joule rotorique dans une phase théoriques avec et sans défaut**



**Figure III.20 Evolution des Pertes Joule rotorique totales théoriques et expérimentales avec et sans défaut**

### Commentaire des résultats

La figure III.18 montre les courbes des courants rotoriques ramenés théoriques avec et sans défaut en fonction du glissement. Ces derniers augmentent avec l'augmentation du glissement, avec un écart entre ces courbes.

La figure III.19 représente les pertes Joule rotoriques théoriques dans une phase pratique avec et sans défauts. Les allures accroissent avec l'augmentation du glissement, ainsi il existe un grand écart entre les résultats avec et sans défaut. On constate une nette augmentation des pertes dans une phase avec défaut qui atteint 160% d'augmentation par rapport au régime sain.

La figure III.20 montre l'évolution des pertes Joule rotorique totales théoriques et expérimentales avec et sans défaut en fonction du glissement. Ces derniers augmentent à l'accroissement du glissement, avec un écart qui atteint 33.6% au régime nominal.

C- Courbes des courants magnétisants et Pertes fer avec et sans défauts

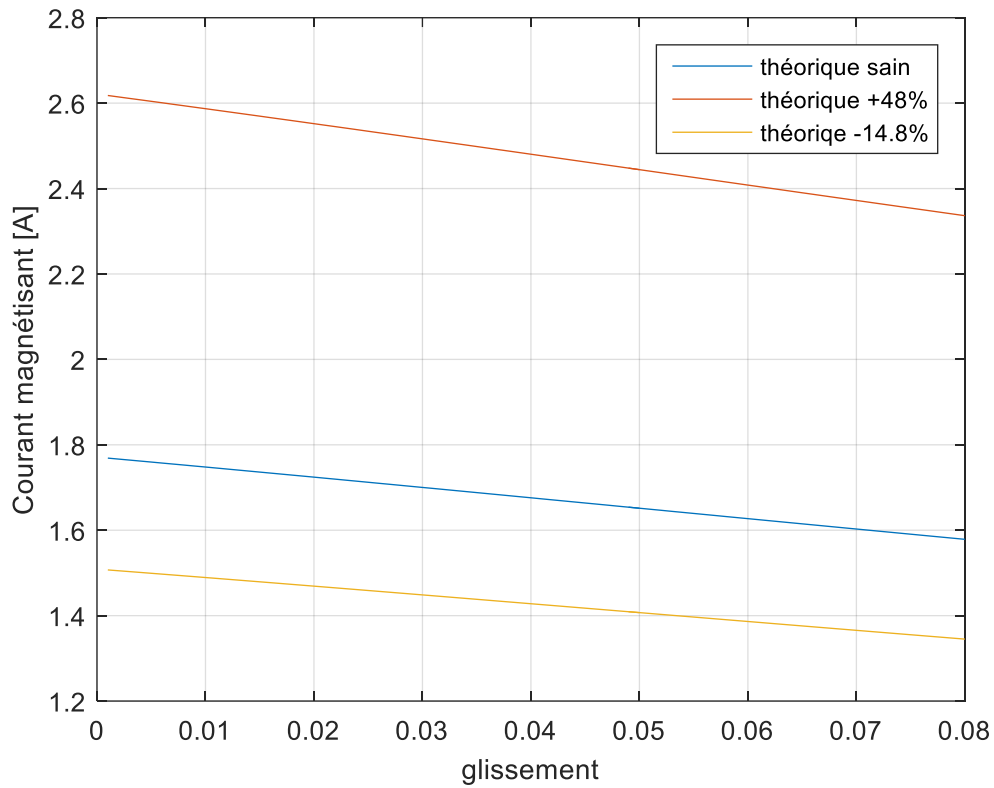


Figure III.21 Evolution des courants magnétisants théoriques avec et sans défaut

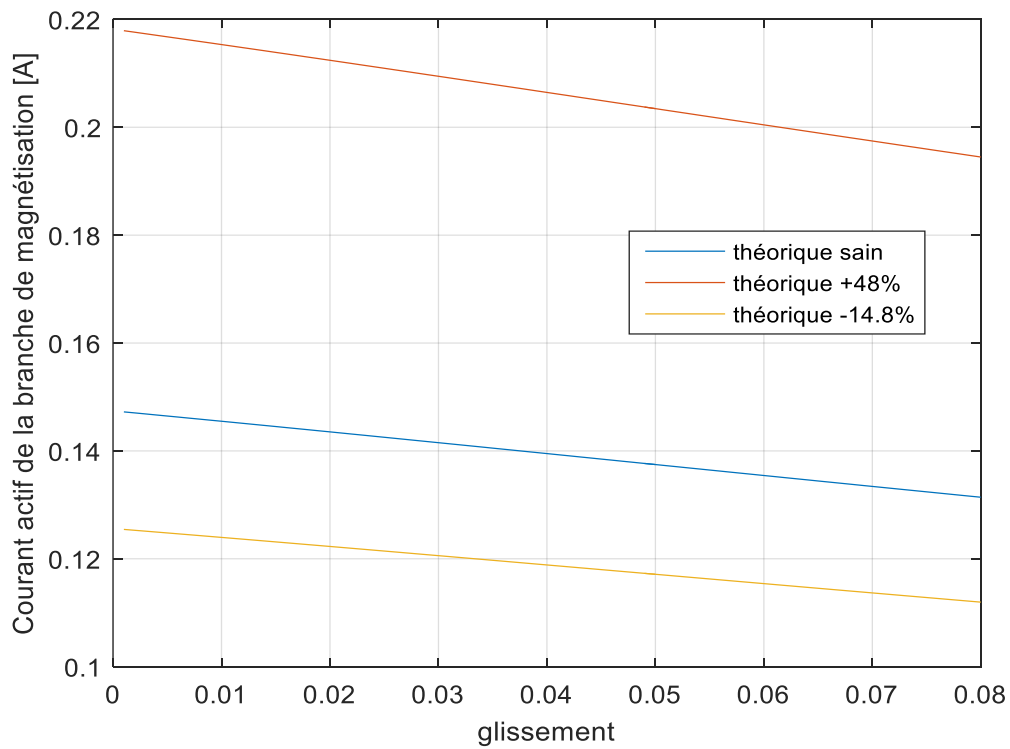


Figure III.22 Evolution des courants actifs de la branche de magnétisation théoriques avec et sans défaut

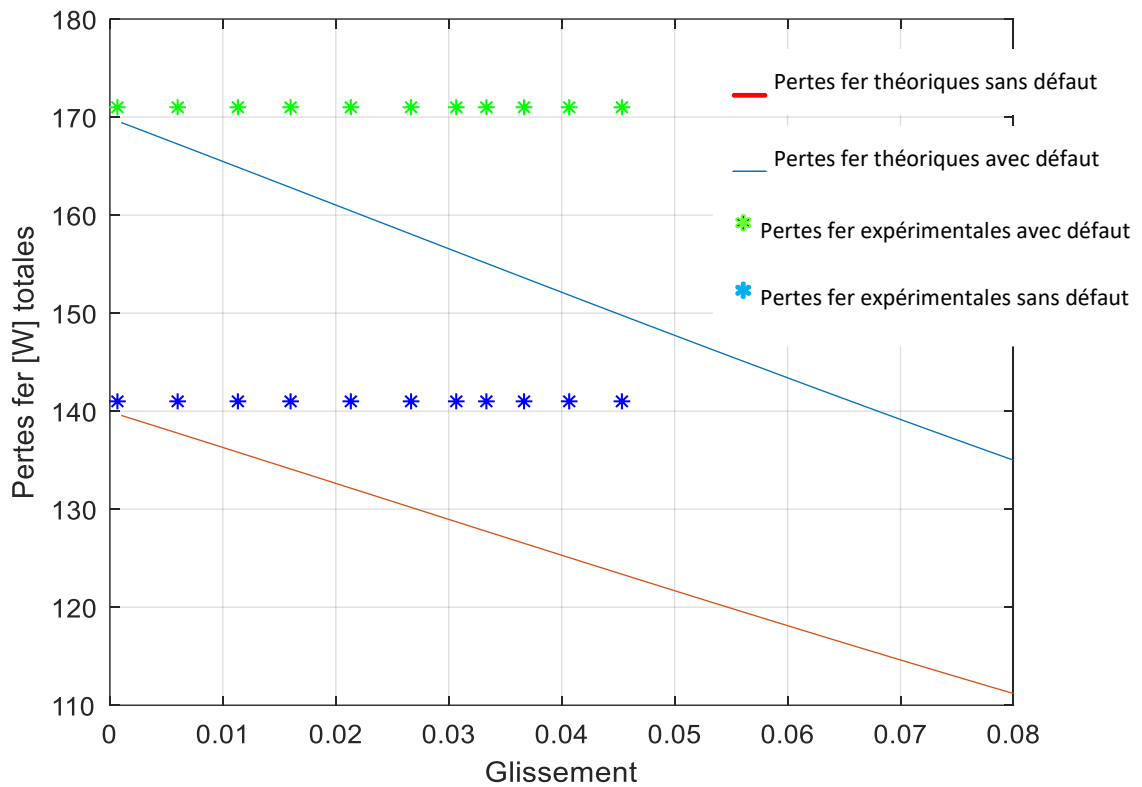


Figure III.23 Evolution des pertes fer totales expérimentales et théoriques avec et sans défaut

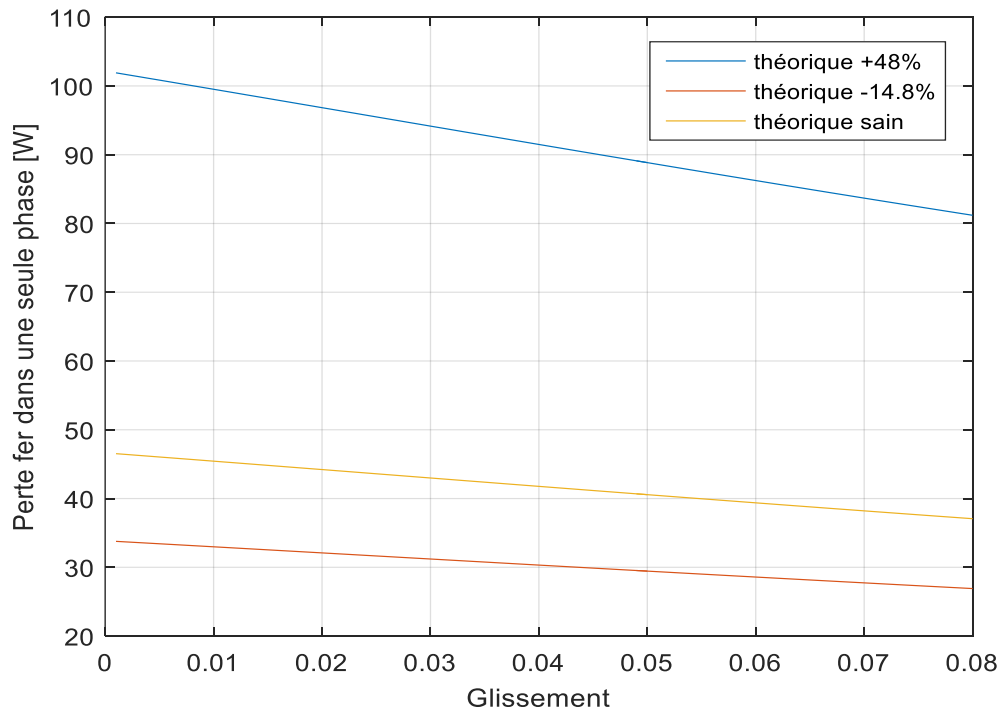


Figure III. 24 Evolution des pertes fer dans une seule phase théoriques avec et sans défaut

### Commentaire

La figure III.21 représente le courant magnétisant théorique avec et sans défauts en fonction du glissement. Le courant diminue avec l'augmentation du glissement.

La figure III.22 représente le courant actif de la branche de magnétisation théorique avec et sans défauts en fonction du glissement. Le courant diminue avec l'augmentation du glissement.

La figure III.23 montre l'évolution des pertes fer expérimentales et théorique avec et sans défaut en fonction du glissement. Nous notons que les pertes fer théorique diminue avec l'augmentation de glissement ainsi les pertes fer expérimentale en régime sain sont stables dont la valeur est 141 W et de 171 W en régime de défaut. On constate aussi que les pertes fer théoriques à vide correspondant aux pertes fer expérimentale.

Les résultats expérimentaux sont stables. On constate que les pertes fer avec défaut sont nettement plus importantes allant jusqu'à 31% d'augmentation par rapport au régime sain.

La figure III.24 montre l'évolution des pertes fer dans une seule phase théoriques avec et sans défaut en fonction du glissement. Ces dernières diminuent en formes parallèle avec l'augmentation du glissement.

### D – Courbes des caractéristiques de fonctionnement avec et sans défaut

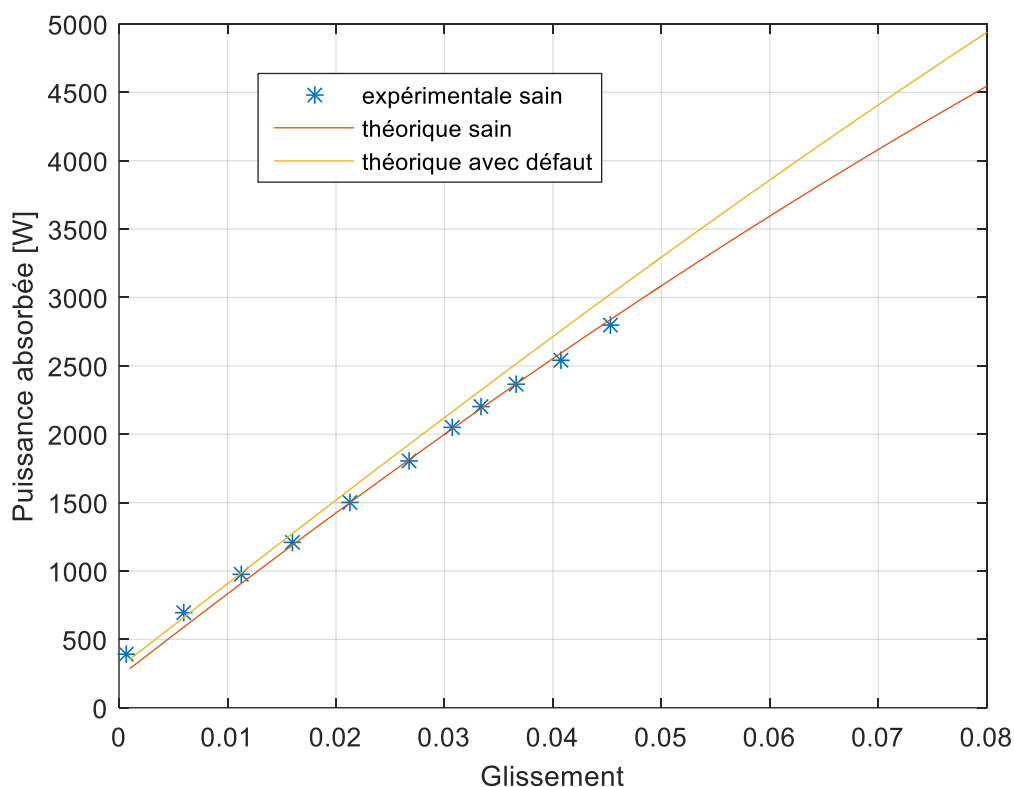


Figure III.25 Evolution des puissances absorbées théoriques et expérimentales sans et avec défaut

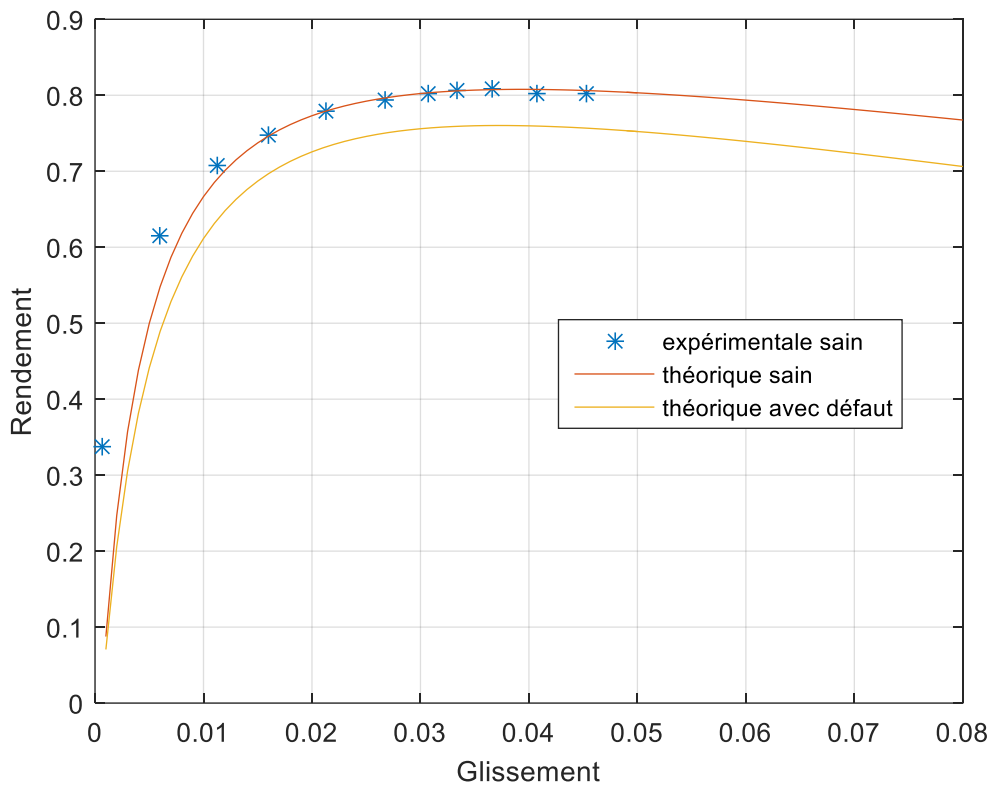


Figure III.26 Evolution des rendements théoriques et expérimentales sans et avec défaut

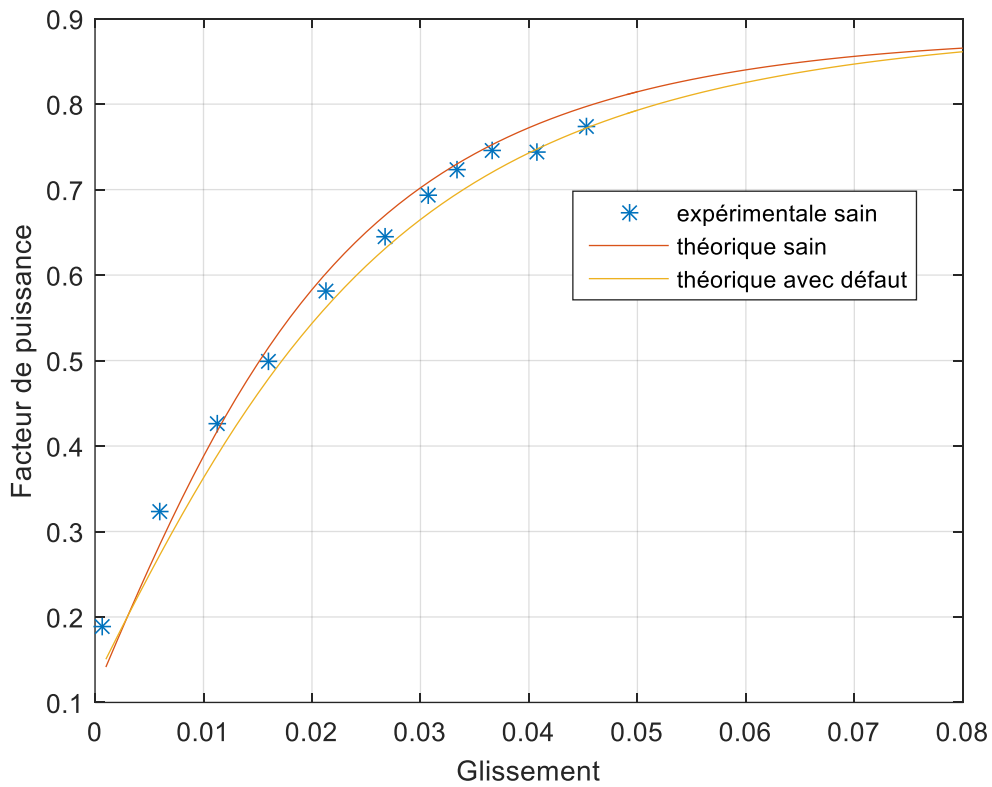


Figure III.27 Evolution du Facteur de puissance théorique et expérimentale sans et avec défaut

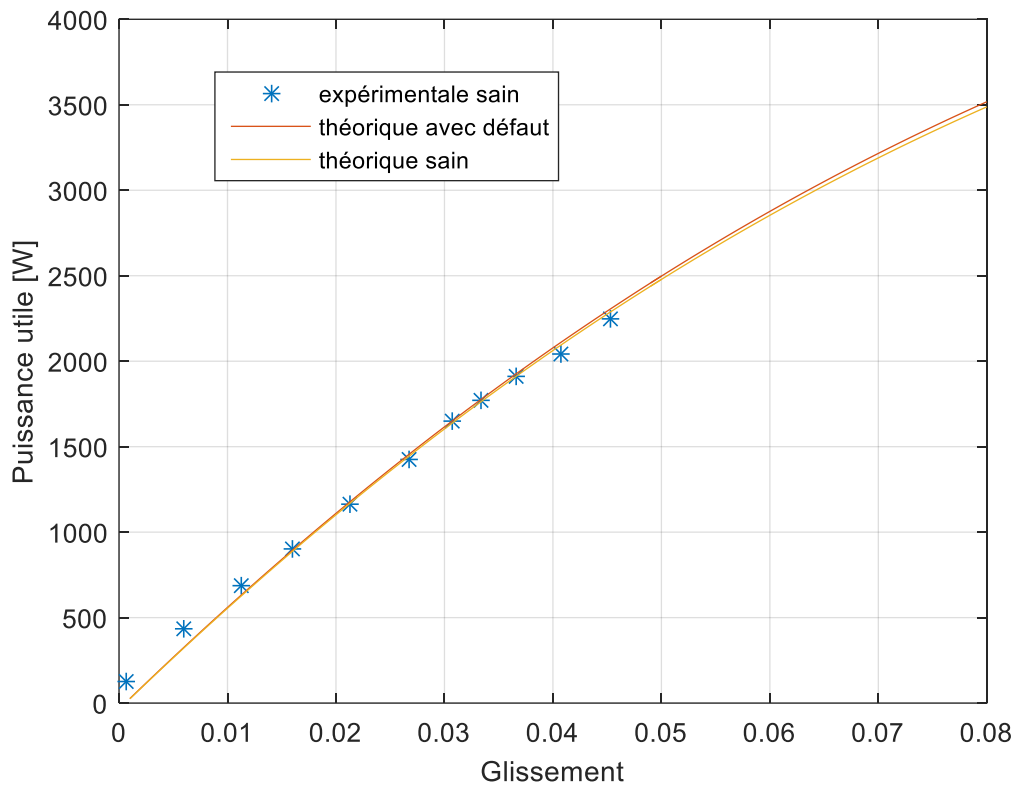


Figure III.28 Evolution de la Puissance utile théorique et expérimentale sans et avec défaut

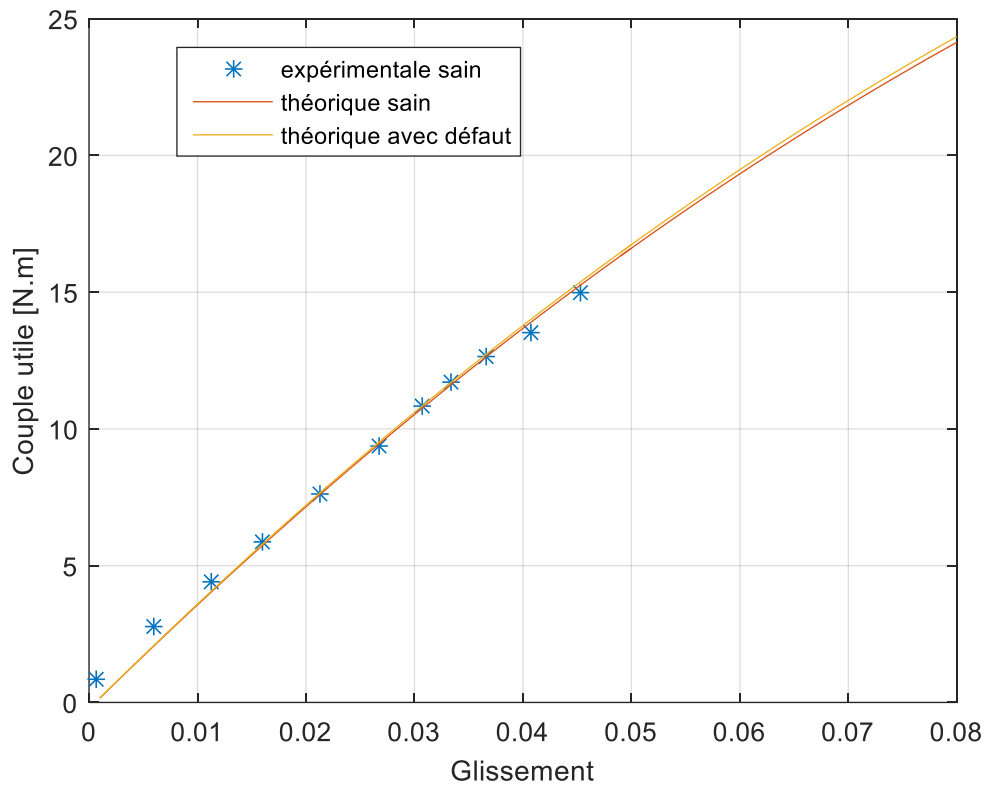


Figure III.29 Evolution du Couple utile théorique et expérimentale sans et avec défaut

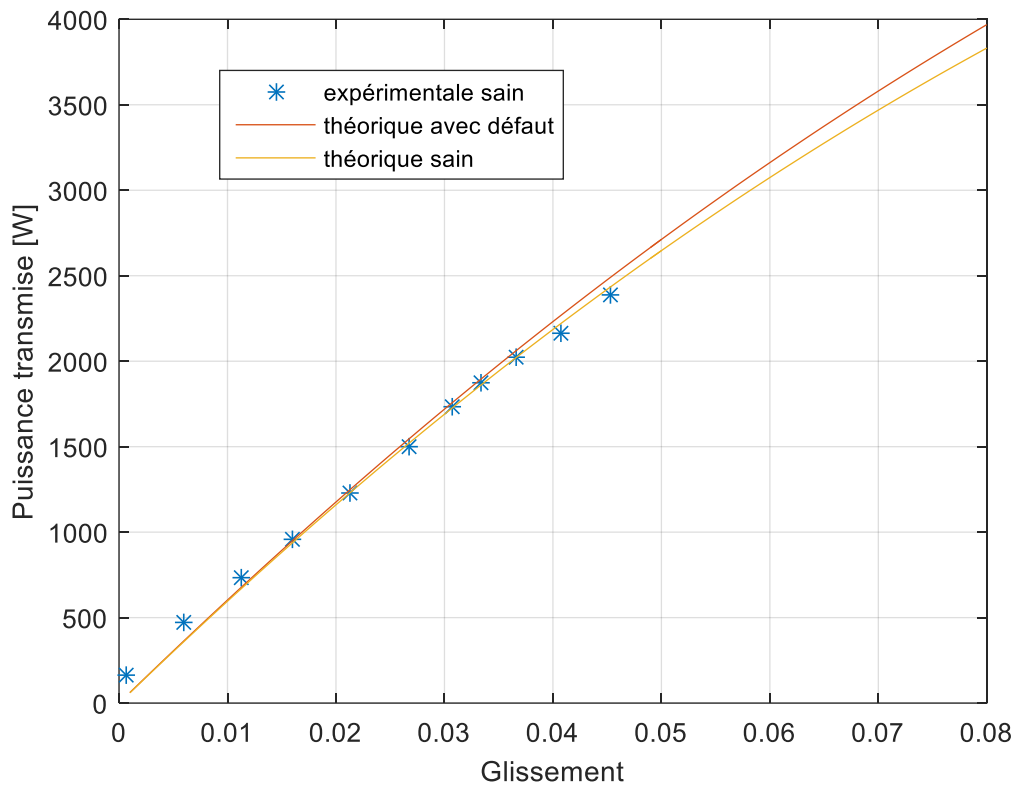


Figure III.30 Evolution de la Puissance transmise théoriques et expérimentale sans et avec défaut

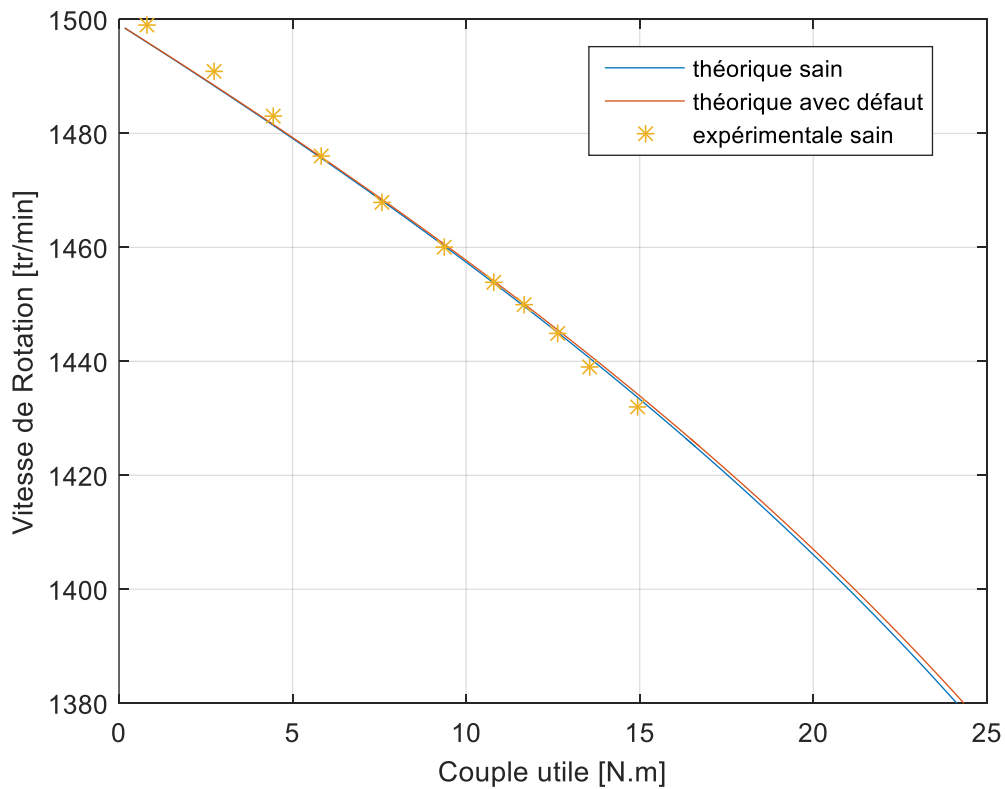


Figure III.31 Evolution de la vitesse de rotation en fonction du couple utile théoriques et expérimentale avec et sans défaut

### **Commentaire**

La figure III.25 montre l'évolution de la puissance absorbée en fonction du glissement. On remarque que la puissance augmente avec l'augmentation du glissement, ainsi un petit écart est observé. On constate que la puissance absorbée augmente en présence du défaut allant jusqu'à 6.5% au point nominale.

La figure III.26 montre que le rendement avec et sans défaut expérimentale et théorique augmentent avec l'augmentation du glissement et passe par un maximum. Les allures sont identiques mais, avec un écart. On constate une diminution de l'ordre de 4% du rendement par rapport au rendement au mode sain.

La figure III.27 montre le facteur de puissance théorique et expérimentale avec et sans défaut. On remarque que le facteur de théorique avec défaut diminue.

La figure III.28 montre la puissance utile théorique et expérimentale avec et sans défaut. On remarque que les puissances utiles théorique avec et sans défaut sont presque identiques.

La figure III.29 montre le couple utile théorique et expérimentale avec et sans défaut. On remarque que les couples utiles théorique avec et sans défaut sont presque identiques.

La figure III.30 montre la puissance transmise théorique et expérimentale avec et sans défaut. On remarque une augmentation de la puissance transmise avec défaut par rapport aux mode sain avec un écart de 3%.

La figure III.31 montre la courbe de la vitesse de rotation en fonction de couple utile théorique et expérimentale avec et sans défaut. On remarque que les vitesses de rotation théorique avec et sans défaut sont presque identique.

### **III.14. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons établi une étude comparative des pertes et les performances d'un moteur asynchrone sans et avec défaut.

Tout d'abord nous avons validé le modèle du circuit équivalent du moteur asynchrone. Nous avons constaté que les performances expérimentales coïncident avec celles obtenues par le schéma équivalent où les paramètres électriques sont estimés par la méthode itérative. Puis à partir d'un essai à vide en mode sain, nous avons réalisé un défaut de coupure d'une phase qui nous a permis d'obtenir les pourcentages de différence entre les courants du mode de défaut par rapport au mode sain. Cela nous a permis de les extrapolés pour obtenir les courants de défaut en charge.

En comparant les différentes pertes (Joule statorique, rotorique et pertes fer), nous avons constaté une nette augmentation de ces pertes, en mode de défaut. La répartition de ces pertes dépend beaucoup du type de couplage et la variation des résistances (statoriques et rotoriques) par rapport à leurs températures. Pour notre cas, ils sont principalement dans une phase par rapport aux deux autres qui sont reliées en série.

Enfin, nous avons constaté que le rendement en présence du défaut de coupure d'une phase a diminué par rapport au régime sain. De même que la puissance absorbée qui augmente avec le défaut. De ce fait, le rendement a chuté de 4% par rapport au mode sain au régime nominal.

## CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude, nous avons examiné les pertes d'un moteur asynchrone lorsqu'il y a une coupure d'une phase d'alimentation. Afin d'accomplir cela, nous avons tout d'abord exposé la structure d'une machine asynchrone, son bilan de puissance et ses pertes, ainsi que ses divers défauts.

Nous avons ensuite employé le schéma électrique équivalent en T d'un moteur asynchrone dont les paramètres électriques ont été identifiés à l'aide de deux méthodes (classique et itérative). Les performances théoriques et expérimentales ont été comparées et il a été démontré que les paramètres déduits par la méthode itérative sont plus précis. Grâce à cela, nous avons pu réaliser ce modèle.

Ensuite, nous avons effectué un essai à vide, en utilisant un couplage triangle, ce qui nous a permis de réaliser le défaut de coupure d'une phase. Ensuite, en analysant les courants de défauts, nous avons constaté que les taux de variation par rapport aux courants sans défauts sont respectivement de 48% d'augmentation pour une phase et de 14.8 % de diminution pour les deux autres phases. Ces pourcentages nous ont permis d'extrapoler le régime sain au régime de défaut en charge.

Après le défaut, nous avons calculé les pertes suivantes à partir des courants déséquilibrés : les pertes Joule statoriques, rotoriques et les pertes fer. En les comparant aux pertes du régime sain, nous avons remarqué une nette augmentation de ces pertes.

De cette manière, les pertes totales Joule statoriques augmentent de 48% par rapport au régime normal au point de fonctionnement nominal. Il est également observé une augmentation de presque 180% des pertes Joule dans une phase statorique par rapport au régime sain au point nominal.

Quant aux pertes joules rotoriques, il est également observé que dans une phase, il y a une augmentation de près de 160% par rapport au régime sain au point nominal. Tandis que les pertes Joule rotoriques totales augmentent de 33.6% par rapport au régime sain pour le même point de fonctionnement.

Par ailleurs, en ce qui concerne les pertes fer expérimentales, elles sont considérées comme constantes et déterminées à partir de l'essai à vide avec entraînement, avec un glissement proche de zéro. En revanche, les pertes fer théoriques calculées sont influencées par le mouvement et diminuent ainsi.

Dans cette situation, il est observé que le défaut entraîne une hausse des pertes fer totales pouvant atteindre 31% par rapport à un régime sain.

Finalement, la coupure d'une phase d'alimentation entraîne une augmentation des pertes et de la puissance absorbée, ce qui entraîne une diminution du rendement allant jusqu'à 4%. De la même manière, ces pertes sont réparties de manière différente par rapport à un régime de fonctionnement sain.

## Annexes

Plaque signalétique du moteur asynchrone étudiée :



## Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne principalement l'évaluation des pertes d'un moteur asynchrone lorsqu'il est soumis à une coupure d'une phase d'alimentation.

Effectivement, un moteur asynchrone fonctionne souvent dans ses limites admissibles et dans un environnement toujours exigeant. De ce fait, il est exposé à diverses sollicitations et défauts qui en découlent et réduisent ainsi sa durée de vie et même son arrêt total. Cela, engendre beaucoup de désagréments surtout aux industriels toujours préoccupés par le gain et la productivité. Parmi les défauts qui affectent les machines électriques, en particulier le moteur asynchrone, on cite l'ouverture d'une phase d'alimentation. Ainsi, dans le but de continuité de service avec ce défaut, il est primordial d'évaluer ses pertes. Cela, afin d'améliorer sa conception pour qu'il puisse continuer à fonctionner, avec ce défaut, du moins pour un certain temps.

Dans cet objectif, premièrement on utilise le modèle du schéma électrique équivalent en T du moteur asynchrone à cage et dont on identifie les paramètres électriques par deux méthodes. L'une classique et l'autre itérative basée sur un essai à vide et un essai en court-circuit. Deuxièmement, les paramètres itératifs sont validés par comparaison des performances théoriques et expérimentales. Ensuite, à partir d'un essai à vide en couplage triangle on réalise la coupure d'une phase. Ce qui nous permet d'obtenir les pourcentages de différences des courants par rapport au mode sain. Ainsi, on obtient 48% d'augmentation pour une phase et 14.8% de diminution pour les deux autres phases. Grâce à ces pourcentages nous avons extrapolé vers l'essai en charge, puis, nous avons calculé les différentes pertes.

Les résultats obtenus en charge montrent que les pertes Joules statorique totales augmentent de 48%, alors que les pertes Joule rotorique totales quant à elles, augmentent de 33.6% et les pertes fer totales s'accroît de 31% par rapport au régime sain au point du fonctionnement nominal. En constate aussi que dans une phase au stator et celle du rotor les pertes Joule sont doubles comparées au régime sain. Par contre, ces pertes diminuent dans les deux autres phases, qui sont connectées en série, par rapport au mode sain.

Il est alors prévisible que la puissance absorbée augmente avec l'augmentation des pertes. Pour cette raison, le rendement chute de seulement 4% par rapport au mode sain. Par voie de conséquence, on peut dire que la distribution des pertes est différente par rapport à celle du mode sain du fait de ce type de défaut. Elles se localisent principalement dans et autour d'une phase et elles s'en trouvent réduites dans et autour des deux autres phases.

**Mots clés :** moteur asynchrone, mode de défauts, coupure de phase, pertes Joule, pertes fer, circuit équivalent, couplage triangle, mode sain.

## Summary

The work presented in this dissertation mainly concerns the evaluation of the losses of an asynchronous motor when it is subjected to an interruption of a power supply phase.

Indeed, an asynchronous motor often operates within its admissible limits and in a always demanding environment. As a result, it is exposed to various stresses and resulting defects and thus reduce its lifespan and even its total shutdown. This causes a lot of inconvenience, especially for manufacturers who are always concerned about profit and productivity. Among the faults which affect electrical machines, in particular the asynchronous motor, we cite the opening of a power phase. Therefore, for the purpose of continuity of service with this defect, it is essential to evaluate its losses. This is to improve its design so that it can continue to function, with this defect, at least for a while.

For this objective, firstly we use the model of the equivalent T-shaped electrical diagram of the cage asynchronous motor and the electrical parameters of which we identify by two methods. One classic and the other iterative based on an empty test and a short-circuit test. Second, the iterative parameters are validated by comparing theoretical and experimental performances. Then, from a no-load test in delta coupling, a phase cut-off is carried out. This allows us to obtain the percentages of differences in the currents compared to the healthy mode. Thus, we obtain 48% increase for one phase and 14.8% decrease for the other two phases. Thanks to these percentages we extrapolated towards the load test, then we calculated the different losses.

The results obtained show that the total stator Joule losses increase by 48%, while the rotor Joule losses, for their part, increase only by 33.6% and the total iron losses increase by 31% compared to the healthy regime at the point of nominal operation. It is also noted that in a phase at the stator and that of the rotor the Joule losses are double compared to the healthy regime. On the other hand, these losses decrease in the other two phases, which are connected in series, compared to the healthy mode.

It is then predictable that the absorbed power increases with the increase in losses. For this reason, the yield drops by only 4% compared to the healthy mode. Consequently, we can say that the distribution of losses is different compared to that of the healthy mode due to this type of fault. They are mainly located in and around one phase and are reduced in and around the other two phases.

**Key words:** asynchronous motor, fault mode, phase cutoff, Joule losses, iron losses, equivalent circuit, delta coupling, healthy mod

**Bibliographie**

- [1] W.BOUDJTAT, A.HIMOURA « Etude et simulation d'une machine asynchrone alimenté par un onduleur de tension à commande MLI »Mémoire de master, université annaba 2017.
- [2] T.CHERGUI , M .DAHMANI « Modèle thermique d'un moteur asynchrone en présence d'un défaut de coupure d'une phase » Mémoire de master , UMMTO 2023.
- [3] K.ALMIRAOUSSAID, Y.SEKKAI « Etude des pertes et leur répartition dans un moteur asynchrone a cage d'écureuil 2.2KW » Mémoire de master , UMMTO 2013.
- [4] O.AREZKI , TH.TIGROUDJA « Pertes d'un moteur asynchrone a cage avec coupure d'une phase » Mémoire de master UMMTO 2023.
- [5] PIERRE MAYE « Moteurs électriques industriels », 3eme édition, paris 2005.
- [6] CHRISTOPHE PLERMO« Précis d'électrotechnique », 2eme édition, Dunod 2022.
- [7]THEODORE WILDI , GILBERT SYBLLIE « Electrotechnique » 4eme édition, de Boeck 2000.
- [8] PIERRE MAYE, aide-mémoire « Electrotechnique » 3eme édition Dunod 2006.
- [9] S.HADJI « Modélisation, observation et commande de la MAS » thèse université de Caen France 2009 .
- [10] PIERRON GEORGES «Introduction au traitement de l'énergie électrique », presses des mines 2003.
- [11] N.KECILI « Etude des pertes et couples pulsatoire dans les MAS alimenté par des convertisseur » Mémoire de magistère UMMTO 2009.
- [12] ALGER.PL « Induction machines » gorden and breach science publishers 1970.
- [13] N.BENAMROUCHE « An investigation of the loss distribution in induction motors fed from non-sinusoidal supplies » phd thesis, department of electrical and electronic engineering university of Sheffield 1991.
- [14] M.HARZELI « Diagnostic et détection des défauts à distance dans les machines électriques » Mémoire de master université Biskra 2019.
- [15] T.ACHOUR « Diagnostic de défaut électrique et mécanique de la MAS a simple cage d'écureuil » Mémoire de magister ENP Alger 2008.
- [16] A.CEBAN « Méthode global de diagnostic des machines électriques » thèse, université de Lille, France 2012.
- [17] O. SAHRAOUI, « Calcul des schémas équivalents de la machine asynchrone par la méthode des éléments finis » Thèse de Doctorat, INP Grenoble, Juin 1994.

[18] K. CHAIR, L. SADI HADDADE « étude et estimation des pertes fer dans une machine asynchrone a cage» mémoire de fin d'étude, 2015, université UMMTO.

[19] P.Barret : « Machines électriques, Théorie et mise en oeuvre », éditions Ellipses 2002.