

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA -BEJAÏA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER

Domaine : Science et Technologies, Filière :Électrotechnique

Spécialité :Machines Electriques

Présenté par:

**BOUZOUBA Nadir et BOUGHANI Nabil**

*Thème*

## Identification et Estimation des Paramètres d'une Machine à Induction

Soutenue le : 18/09/2022

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
<b>AOUZELLAG Djamel</b>	Professeur	Univ. de Bejaïa	Président
<b>MEDJOU DJ Rafik</b>	MCA	ESTIN	Encadrant
<b>AMROUCHE Bessam</b>	MCB	Univ. de Bejaïa	Co-Encadrant
<b>BERBOUCHA Ali</b>	MCB	Univ. de Bejaïa	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

# Avant-propos

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de Master au Département de Génie Électrique de la Faculté de Technologie de l'Université de Bejaïa.

En premier lieu, nous tenons à exprimer notre gratitude à nos encadreurs Mr. MEDJOU DJ Rafik, maître de conférence classe A de l'école ESTIN et Mr. AMROUCHE Bisseem Maître de conférence classe B de l'université de Bejaïa, pour leurs suivis et les efforts fournies durant ce travail. Nous les remercions pour nous avoir fait profiter de leurs expériences, pour orientations qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait monsieur AOUZELLAG Djamel, pour avoir accepté de présider et de nous honorer de sa présence au sein du jury de soutenance du présent mémoire ; qu'il trouve ici l'expression de notre reconnaissance et de notre respect.

Enfin, nous tenons également à adresser nos vifs remerciements au Mr. BERBOUCHA Ali , nous le remercions chaleureusement pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire et pour ses observations et remarques pertinentes et constructives.

Nous remercions également Mr. OUBELAID Adel, Mr. ALITOU CHE Karim, Mr. AOUZELLAG Djamel et Mr. KASDI Ahmed pour leurs coopérations et leurs gentillesse, ainsi que l'ensemble des enseignants du département pour leur dévouement.

Merci enfin à tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

## ***D*EDICACES**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents qui m'ont soutenu durant ce projet ;*

*Mes chers cousins et cousines et tous les membres de ma famille ;*

*Mes copains de chambre Djemaa et Hichem ;*

*Et tous mes amis et la promotion ME qui m'ont aidé à réaliser ce travail.*

*Bouzouba Nadir*

*Bejaia. le 05/09/2022*

## ***D**EDICACES*

*Je dédié ce modeste travail à :*

*Ma mère ;*

*Mon père ;*

*Toute ma famille ;*

*Tous mes amis et mes collègues ;*

*Ceux qui ont priés pour moi, encourager et m'ont aidé.*

*Boughani Nabil*

*Bejaia. le 05/09/2022*

# Table des matières

<b>Table des matières .....</b>	<b>1</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>5</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>7</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>8</b>
<b>Introduction générale et état de l'art .....</b>	<b>12</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les machines à induction et méthodes d'optimisation ..</b>	<b>18</b>
I.1 Introduction .....	18
I.2 Machine à induction .....	18
I.3 Principe de fonctionnement.....	20
I.3.1 Fréquence rotorique .....	21
I.3.2 Différents régimes de fonctionnement de la machine asynchrone .....	21
I.3.3 Bilan de puissance .....	21
I.3.4 Variation des paramètres de la machine à induction .....	23
a. Variation des résistances.....	23
b. Variation des inductances .....	24
I.4 Méthodes d'optimisation.....	24
I.4.1 Étapes de l'optimisation .....	24
a. Analyse et formulation du problème.....	24
a. Modélisation mathématique du problème .....	24
b. Méthode de résolution du problème .....	24
I.4.2 Problèmes d'optimisation .....	25
I.4.3 Classification des méthodes d'optimisation .....	25
I.5 Optimisation par les Méta-heuristiques.....	26
I.6 Optimisation par essaims de particules .....	27
I.6.1 Principe.....	27
I.6.2 Avantages et inconvénients de la technique PSO.....	28
I.6.3 Caractéristiques et modèle mathématique du PSO .....	28

I.6.4	Configuration de la méthode .....	30
a.	Initialisation de l'essaim et nombre de particules.....	30
a.	Topologie du voisinage .....	30
b.	Facteur d'inertie.....	31
c.	Coefficients de confiance .....	31
d.	Vitesse maximale.....	32
e.	Notion de confinement .....	32
f.	Critères d'arrêt.....	32
I.6.5	Concept de la version originale .....	33
I.7	Conclusion.....	34
<b>Chapitre II : Techniques d'identification des machines à induction .....</b>		<b>36</b>
II.1	Introduction .....	36
II.2	Étapes d'identification.....	36
II.2.1	Extraction des données.....	36
II.2.2	Choix de la structure du modèle .....	37
II.2.3	Choix du critère d'estimation paramétrique .....	37
II.2.4	Estimation paramétrique .....	37
II.2.5	Validation du modèle.....	37
II.3	Méthodes d'identification des paramètres d'une machine asynchrone. ....	38
II.3.1	Méthode de la plaque signalétique.....	38
II.3.2	Méthode du catalogue .....	39
II.3.3	Méthode des essais classiques .....	39
II.3.4	Essai de ralentissement .....	39
II.3.5	Méthode de séparation des pertes .....	39
II.3.6	Méthode itérative .....	39
II.3.7	Méthodes des Moindres carrés.....	40
a.	Algorithme du gradient.....	40
a.	Algorithme de Gauss-Newton .....	40
b.	Algorithme Levenberg-Marquardt.....	40

II.3.8	Méthodes d'optimisation par des algorithmes évolutionnaires .....	40
II.3.9	Méthode fréquentielle .....	41
II.3.10	Méthode des éléments finis.....	41
II.3.11	Essais fréquentsiels en vue de l'identification de la MAS .....	41
II.3.12	Essais à tension constante et à fréquence variable.....	42
II.3.13	Essais par la méthode SSFR ( $V/f = \text{cst}$ ).....	42
II.3.14	Essai à échelon de tension.....	42
II.3.15	Méthode de BROÏDA .....	43
II.4	Conclusion.....	44
<b>Chapitre III : Partie expérimentale .....</b>		<b>46</b>
III.1	Introduction .....	46
III.2	Présentation du milieu expérimentale .....	46
III.3	Identification avec la méthode de la plaque signalétique.....	49
III.4	Essais classiques.....	49
III.4.1	Essai en continue.....	50
III.4.2	Essai à vide .....	50
a.	Variation des paramètres de la machine dans le cas étudié .....	51
b.	Résultats de l'essai à vide.....	54
III.4.3	Essai à rotor bloqué.....	56
III.5	Calcul des paramètres mécaniques .....	58
III.5.1	Calcul du moment d'inertie avec l'essai de ralentissement .....	58
III.5.2	Coefficient de frottement .....	59
III.6	Résultats des essais.....	59
III.7	Conclusion.....	60
<b>Chapitre IV : Application de la méthode PSO à l'estimation des paramètres .....</b>		<b>62</b>
IV.1	Analyse et formulation du programme (introduction) .....	62
IV.1.1	Système modèle de la machine .....	62

IV.1.2	Optimisation par essaim de particules .....	64
IV.2	Résultats et discussion.....	66
IV.2.1	Résultats d'estimation des grandeurs .....	66
IV.3	Simulation pour l'essai à vide .....	66
IV.4	Exécution pour l'essai à rotor bloqué.....	69
IV.5	Classification et comparaison entre les méthodes précédentes .....	72
IV.6	Conclusion.....	72
	<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>74</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>76</b>

# Liste des figures

Figure I-1 : Différentes parties d'une machine à induction marque LEROY-SOMER [17]. ..	19
Figure I-2 : Rotor à cage [18].....	20
Figure I-3 : Principe de fonctionnement des machines à induction [21].....	21
Figure I-4 : Schéma représentatif du bilan de puissance d'une machine asynchrone [23]. ....	22
Figure I-5 : Différence entre un optimum global et des optima locaux [25].....	25
Figure I-6 : Classification des méthodes d'optimisation [25].....	26
Figure I-7 : Classification des algorithmes métaheuristiques [28].....	27
Figure I-8 : Le déplacement de la $i^{\text{ème}}$ particule.....	29
Figure I-9 : La zone probable du déplacement suivant R1 ou R2 [30]. ....	32
Figure I-10 : Organigramme de la version originale de PSO.....	33
Figure II-1 : Procédure d'identification d'un système .....	38
Figure II-2 : Principe d'un algorithme évolutionnaire (EA) [41].....	41
Figure II-3 : Méthode de Broïda [43].....	43
Figure III-1 : Maquette des essais et acquisitions des données.....	46
Figure III-2 : Module POWER ANALYSER. ....	47
Figure III-3 : Interface du programme LabVIEW.....	47
Figure III-4 : Echauffement de la MAS avec une charge (génératrice alimente une charge)..	48
Figure III-5 : Montage du MAS en tension continue. ....	50
Figure III-6 : Schéma montage MAS à vide. ....	50
Figure III-7 : Circuit de l'impédance équivalente de la MAS. ....	52
Figure III-8 : Variation de l'inductance équivalente de la machine en fonction de la tension .	52
Figure III-9 : Variation de la résistance équivalente de la machine en fonction de la tension.	53
Figure III-10 : Variation de la résistance durant le refroidissement de la machine. ....	54
Figure III-11 : Droite des pertes mécaniques et pertes fer avec la séparation des pertes.....	55
Figure III-12 : Résolution de la droite à $(x=0)$ pour déterminer les pertes mécaniques .....	55
Figure III-13 : Schéma du montage de l'essai à rotor bloqué.....	56
Figure III-14 : Courbe de ralentissement. ....	58
Figure IV-1 : système d'estimation des paramètres du MAS avec PSO. ....	62
Figure IV-2 : Organigramme du programme d'estimation des paramètres.....	63
Figure IV-3 : Schéma équivalent d'une MAS à vide.....	63
Figure IV-4 : Schéma équivalent d'une MAS à rotor bloqué.....	64

Figure IV-5 : Organigramme du programme PSO.....	65
Figure IV-6 : Variation du courant estimer en fonction de l'impédance .....	66
Figure IV-7 : Résultats PSO pour l'essai à vide. ....	67
Figure IV-8 : Variation de la position de Gbest durant les itérations.....	68
Figure IV-9 : Variation de la fonction cout(Gbest) durant les itérations. ....	69
Figure IV-10 : Résultats de PSO pour l'essai à rotor bloqué.....	70
Figure IV-11 : Variation de la position de $G_{best}$ durant les itérations.....	71
Figure IV-12 : Variation de la fonction coût( $G_{best}$ ) durant les itérations. ....	71

# Liste des tableaux

Tableau 4-1. Résultats des calculs des paramètres avec la méthode de plaque signalétique ....	49
Tableau 2. Une partie des données acquises lors d'entraînement à vide (sélectionner aléatoirement).....	51
Tableau 3. Une partie des données acquises lors d'entraînement à rotor bloqué (sélectionner aléatoirement).....	57
Tableau 4. Résultats des paramètres par les différentes méthodes appliquées. ....	72

# Liste des abréviations

$e$  : force électromotrice .

$\Psi$  : flux magnétique.

$F$  : force de Laplace.

$B$  : induction magnétique .

$N_s$  : vitesse de rotation du champ statorique (tr/min).

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

$f_s$  : fréquence du réseau.

$p$  : nombre de paires de pôles.

$\omega_s$  : pulsation statorique.

$\omega_r$  : pulsation rotorique.

$\Omega_s$  : vitesse de rotation du champ statorique (rad/s).

$\Omega_r$  : vitesse de rotation du rotor (rad/s).

$f_s$  : fréquence de la tension et courant statoriques.

$f_r$  : fréquence du courant rotoriques.

$C_u$  : couple utile de la machine.

$U_s$  : tension statorique entre phases.

$I_s$  : courant de ligne statorique.

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

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

$P_a$  : la puissance active absorbée.

$P_{js}$  : pertes par effet joule dans le stator.

$P_{jr}$  : pertes par effet joule dans le rotor

$P_{fs}$  : pertes de fer au stator.

$P_{fr}$  : pertes de fer au rotor.

$P_{tr}$  : puissance transmise au rotor.

$C_{em}$  : couple électromagnétique [N.m].

$g$  : glissement.

$P_m$  : puissance mécanique.

$P_{méc}$  : pertes mécaniques.

$P_u$  : puissance utile.

$\eta$  : rendement.

$R_s$  : résistance d'un enroulement statorique.

$L_s$  : inductance cyclique statorique.

$l_s$  : inductance propre statorique.

$M$  : mutuelle entre stator et rotor.

$L_r$  : inductance cyclique rotorique.

$R_r$  : Résistance d'un enroulement rotorique.

$L_r'$  : inductance cyclique rotorique ramené au primaire (stator).

$R_r'$  : Résistance rotorique ramené au primaire (stator).

$\sigma$  : facteur de dissipation de Blondel.

$\tau_r$  : constante du temps rotorique.

$Q_{a0}$  : puissance réactive à vide.

$Q_{acc}$  : puissance réactive en court-circuit.

$P_{a0}$  : puissance active à vide.

$P_{acc}$  : Puissance active en court-circuit.

$V_{s0}$  : tension simple à vide.

$V_{sc}$  : tension simple en court-circuit.

$I_{s0}$  : courant à vide.

$I_{sc}$  : courant en court-circuit.

$j$  : image du courant.

$J$  : moment d'inertie.

$f$  : coefficient des frottement visqueux.

$PSO$  : optimisation par essaim de particules (particul swarm optimisation).

# INTRODUCTION GÉNÉRALE ET ÉTAT DE L'ART



# Introduction générale et état de l'art

Actuellement, l'énergie consommée en milieu industriel, est en grande partie d'origine électrique. Cette énergie est essentiellement transformée en énergie mécanique par l'intermédiaire des machines électriques [1], Le processus de fabrication de ces machines nécessite des équations, puis une modélisation afin de pouvoir simuler le modèle sur un ordinateur et l'optimiser pour arriver à un produit final prêt à être fabriqué.

Depuis l'invention de la machine asynchrone en 1889, elle ne cesse de progresser [2], ceci est dû à sa robustesse, sa grande fiabilité, la quasi-absence de l'entretien, sa facilité de mise en œuvre, la simplicité de sa construction et son coût réduit.

Cette machine est largement utilisée dans la plupart des entraînements électriques, et dans divers domaines industriels, notamment pour des applications à vitesse variable, et même dans des applications de grande précision comme le domaine de l'aéronautique, la robotique et dans certains mécanismes industriels à haute précision [3] [4]. Elle permet d'entraîner efficacement des tapis et des bandes en aluminium et en papier. Elle peut aussi être intégrée dans des systèmes comme les machines-outils et notamment les éoliennes.

La machine asynchrone, couramment employée en moteur, constitue actuellement le convertisseur électromécanique le plus utilisé grâce à ses nombreux avantages. Le développement considérable de l'électronique de puissance supporté par la microinformatique, permettant ainsi une alimentation à fréquence variable, confère à la machine asynchrone un intérêt particulier dans les entraînements à vitesse variable. Le champ de ses applications prend une extension appréciable dans la plupart des secteurs de l'industrie et du transport [1].

De multiples recherches ont été réalisées sur l'identification et l'optimisation des paramètres des machines asynchrones tel que les travaux publiés que nous citons ci-dessous ;

Hamid SEDIKI, Ali BECHOUCHE, Djaffar OULD ABDESLAM et Salah HADDADA ont publié un article en 2012 intitulé « *ADALINE approach for induction motor mechanical parameters* » [5]. Ils présentent deux nouvelles méthodes pour identifier les paramètres mécaniques des entraînements à orientation de champ basés sur des moteurs à induction. Les paramètres identifiés sont : le moment d'inertie et le Coefficient d'amortissement visqueux. Les méthodes proposées sont basées sur les réseaux de neurones linéaires adaptatifs (ADALINE) [5].

En 2010, V.P. Sakthivel, R. Bhuvanewari et S. Subramanian ont publié un article « *Artificial immune system for parameter estimation of induction motor* »

[6]. L'article présente un nouvel algorithme basé sur l'algorithme immunitaire (AI) pour optimiser les paramètres de trois modèles différents de moteurs à induction à partir des données du fabricant et/ou des tests. Les équations non linéaires du moteur à induction à résoudre pour l'estimation des paramètres sont formulées comme un problème de minimisation. Les paramètres du circuit équivalent sont obtenus comme solution de minimisation d'une fonction d'erreur carrée normalisée de la différence entre les données estimées et celles du fabricant. L'approche IA proposée a été testée et examinée sur deux échantillons de moteurs différents. Les résultats de l'approche proposée ont été comparés à ceux de la technique classique d'estimation des paramètres et de l'algorithme génétique (AG). Les résultats montrent l'efficacité et la robustesse de l'approche proposée [6].

Un nouvel observateur adaptatif est proposé pour réaliser une estimation en ligne de l'état et des paramètres de la partie électrique des moteurs à induction. Un article réalisé par « Paolo Castaldi, Walter Geri, Marcello Montanari, Andrea Tilli » en 2002, publié ensuite en 2004, intitulé « *A new adaptive approach for on-line parameter and state estimation of induction motors* » [7]. Annonce : La vitesse mécanique du rotor et les courants/tensions du stator sont supposés être mesurés. Une représentation particulière d'état non minimal du modèle électrique de la machine est dérivée et exploitée pour construire l'observateur adaptatif, basé sur une architecture série-parallèle. La conception de Lyapunov est utilisée pour développer la loi d'adaptation de la solution proposée. Les résultats de simulation et les tests expérimentaux confirment les bonnes performances de la technique [7].

*Parameter estimation in induction motors: a comparison between the PE and the TS paradigm* [8], un titre de l'article publié par S. Bittanti, S. Garatti et M. Sarati en 2011, ils présentent dans leur article, qu'ils considèrent le problème de l'estimation des paramètres inconnus du modèle d'un moteur à induction dans un environnement sans capteur. Une pratique courante consiste à effectuer l'estimation par une série de tests sur banc, en laissant le moteur fonctionner en régime permanent. Cette façon de procéder ne tient toutefois pas compte de la grande sensibilité de certains paramètres aux conditions de fonctionnement du moteur. Le problème est donc de mettre en place un estimateur automatique, capable de fournir des estimations fiables des paramètres à partir de mesures prises lors du fonctionnement réel du moteur. Deux paradigmes d'estimation différents sont comparés, à savoir le paradigme de l'erreur de prédiction (PE : Prediction Error), qui est devenu un

standard dans la pratique de l'identification des systèmes, et le paradigme à deux étapes (TS : Two-Stage) récemment introduit. Les avantages et les inconvénients de ces méthodes dans le contexte des moteurs à induction sont identifiés au moyen d'expériences de simulation. Il s'avère que la méthode TS peut offrir une alternative valable à la méthode PE [8].

Dans un autre article publié en 2004, par « Rasmus K. Ursema , Pierré Vadstrup » intitulé « *Parameter identification of induction motors using stochastic optimization algorithms* » [9]. Annoncent : nous abordons le manque de recherche pour l'identification des paramètres des moteurs à induction. Dans nos expériences, nous comparons les performances de huit algorithmes d'optimisation stochastique pour l'identification de deux moteurs à induction. Les huit algorithmes représentent quatre groupes principaux d'algorithmes actuellement utilisés pour l'optimisation numérique. Ces quatre groupes sont : la recherche locale (LS), les stratégies d'évolution (ES), les algorithmes évolutionnaires générationnels (EA) et les optimiseurs à essaims de particules (PSO). La comparaison porte sur un algorithme simple et un algorithme avancé de chaque groupe. De nos expériences, nous tirons deux conclusions. Premièrement, les algorithmes avancés ont obtenu des performances nettement supérieures à celles des algorithmes simples. Cela souligne l'importance d'utiliser des algorithmes avancés lorsqu'on aborde des problèmes du monde réel. De plus, l'amélioration des performances justifie et motive le développement de techniques plus avancées. Deuxièmement, les techniques d'optimisation stochastique basées sur la population (ESs, EAs, et PSOs) ont significativement surpassé les algorithmes de recherche locale sur les deux problèmes [9].

Des travaux réalisés en 2018 par « pour le transport ferroviaire électrique en Chine », un article intitulé « *Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review* » [10] qui présente une revue complète des méthodes d'identification en ligne et hors ligne. Dans la mise en œuvre de l'identification hors ligne, une tension continue ou un signal de tension alternative monophasé est injecté pour maintenir le moteur à induction à l'arrêt, et les algorithmes d'identification correspondants sont discutés dans l'article. De plus, les méthodes d'identification des paramètres en ligne sont illustrées, y compris les moindres carrés récursifs, le système adaptatif à référence de modèle, l'injection de tension CC et CA haute fréquence, et les techniques basées sur des observateurs, etc. Des simulations sur les techniques d'identification sélectionnées appliquées à un exemple de moteur à induction sont présentées pour démontrer leurs performances et illustrer l'identification des paramètres [10].

Dans un autre article, trait de l'estimation en ligne de l'état et des paramètres d'une classe raisonnablement large de systèmes non linéaires à temps continu en utilisant une approche d'observateur à mode glissant pas à pas. La méthode proposée peut également être utilisée pour l'adaptation aux paramètres qui varient avec le temps. L'autre caractéristique intéressante de la méthode est qu'elle est facilement implémentable en temps réel. L'efficacité de cette technique est démontrée par l'estimation en ligne des paramètres électriques et du flux rotorique d'un moteur à induction. Cette application est basée sur le modèle standard du moteur à induction exprimé en coordonnées rotoriques, le courant et la tension du stator ainsi que la vitesse du rotor étant supposés être mesurables. Des résultats d'implémentation en temps réel sont ensuite présentés et la capacité de l'algorithme à estimer rapidement les paramètres du moteur est démontrée. Ces résultats montrent la robustesse de cette approche par rapport au bruit de mesure, aux effets de discrétisation, aux incertitudes sur les paramètres et aux imprécisions de modélisation. Des comparaisons entre les résultats obtenus et ceux de l'algorithme classique des moindres carrés récursifs sont également présentées. Les résultats de l'implémentation en temps réel montrent que l'algorithme proposé donne de meilleures performances que la méthode récursive des moindres carrés en termes de taux de convergence et de robustesse par rapport au bruit de mesure [11]. Ce travail réaliser porte un titre « *Parameter Estimation Methodology For Nonlinear Systems: Application To Induction Motor* » publié en 2005 [11].

De multiples approches d'IA sont utilisées pour prendre automatiquement des décisions de diagnostic sur la base des symptômes mesurés. Les plus populaires sont les réseaux neuronaux artificiels (ANN) et leur version modifiée, les machines vectorielles de soutien (SVM Support Vector Machines). Ils sont largement utilisés dans le diagnostic en raison de leur capacité de généralisation, leur rapidité d'exécution et leur efficacité de leurs algorithmes d'apprentissage [12], que Piotr Bilski a publié un article intitulé « *Application Of Support Vector Machines To The Induction Motor Parameters Identification* » en 2013.

Un article traite des techniques des moindres carrés (LS : Least Square) et des algorithmes génétiques (AG) pour l'identification hors ligne des paramètres des moteurs à induction à partir de la connaissance des courants, des tensions et de la vitesse du stator. En vue d'utiliser les algorithmes LS pour l'identification analytique, le filtrage des données acquises expérimentalement est effectué par des filtres anti-causaux. Les méthodes basées sur les AG recherchent les paramètres qui correspondent le mieux au comportement entrée-sortie du moteur. Les deux méthodes sont étudiées et comparées au moyen d'expériences réalisées sur

un moteur à induction de I-kW. Ce travail a été réalisé par [13] » et publier en 1998 intitulé : « **Parameter Identification Of Induction Motors: Least Squares Vs. Genetic Algorithms** ».

Cesareo Raimundez et Jose-Luis Camano on réaliser des travaux sur l'identification paramétriques des machines. L'article applique les stratégies évolutives au problème de l'identification des paramètres des moteurs à induction. Les paramètres du modèle forfaitaire sont estimés en utilisant les données transitoires de démarrage. On suppose un moteur à induction triphasé équilibré. Des mesures des courants et des tensions du stator sont nécessaires pour la procédure d'identification, mais aucune mesure de l'arbre du moteur n'est requise. La méthode génère des historiques temporels pour l'induction du rotor, la rotation de l'arbre et les courants du rotor, en comparant ces résultats avec les données mesurées. Les paramètres sont associés au meilleur ajustement entre les données et les simulations [14].

On cite aussi d'autre méthodes d'identification les plus utilisées qu'on va définir dans le deuxième chapitre.

Une connaissance parfaite des paramètres d'une machine à induction est indispensable afin d'étudier ou de faire fonctionner cette machine. C'est dans cette thématique que s'inscrit le travail de notre projet de fin d'étude intitulé « **Identification et Estimation des Paramètres d'une Machine à Induction** ».

Pour bien présenter notre travail nous l'avons organisé comme suit :

- Un chapitre préliminaire est un aperçu général sur l'état de l'art de l'identification des paramètres d'une machine asynchrone ;
- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les machines à inductions, leur construction, différents types de fonctionnement ;
- Dans le deuxième chapitre, des différentes méthodes d'identification des paramètres de la machine asynchrone sont développées ;
- Le troisième chapitre est consacré à une application portant sur l'identification d'une machine asynchrone à cage d'une puissance de 3 kW ;
- Le quatrième chapitre, représente une optimisation des paramètres de la machine asynchrone par la méthode du PSO (Particul swarm optimisation) ;
- Nous terminons le travail par une conclusion et perspectives.

# CHAPITRE I

Généralités sur les machines à induction et  
méthodes d'optimisation

# Chapitre I

## Généralités sur les machines à induction et méthodes d'optimisation

### I.1 Introduction

Le terme de machine asynchrone « MAS » ou d'induction regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. En fait, le fonctionnement moteur de cette machine correspond au cas où elle transformerait l'énergie électrique qu'elle absorbe en énergie mécanique rotationnelle. L'opération inverse correspond au fonctionnement générateur. Entre autres, nous pouvons distinguer deux principaux types de MAS :

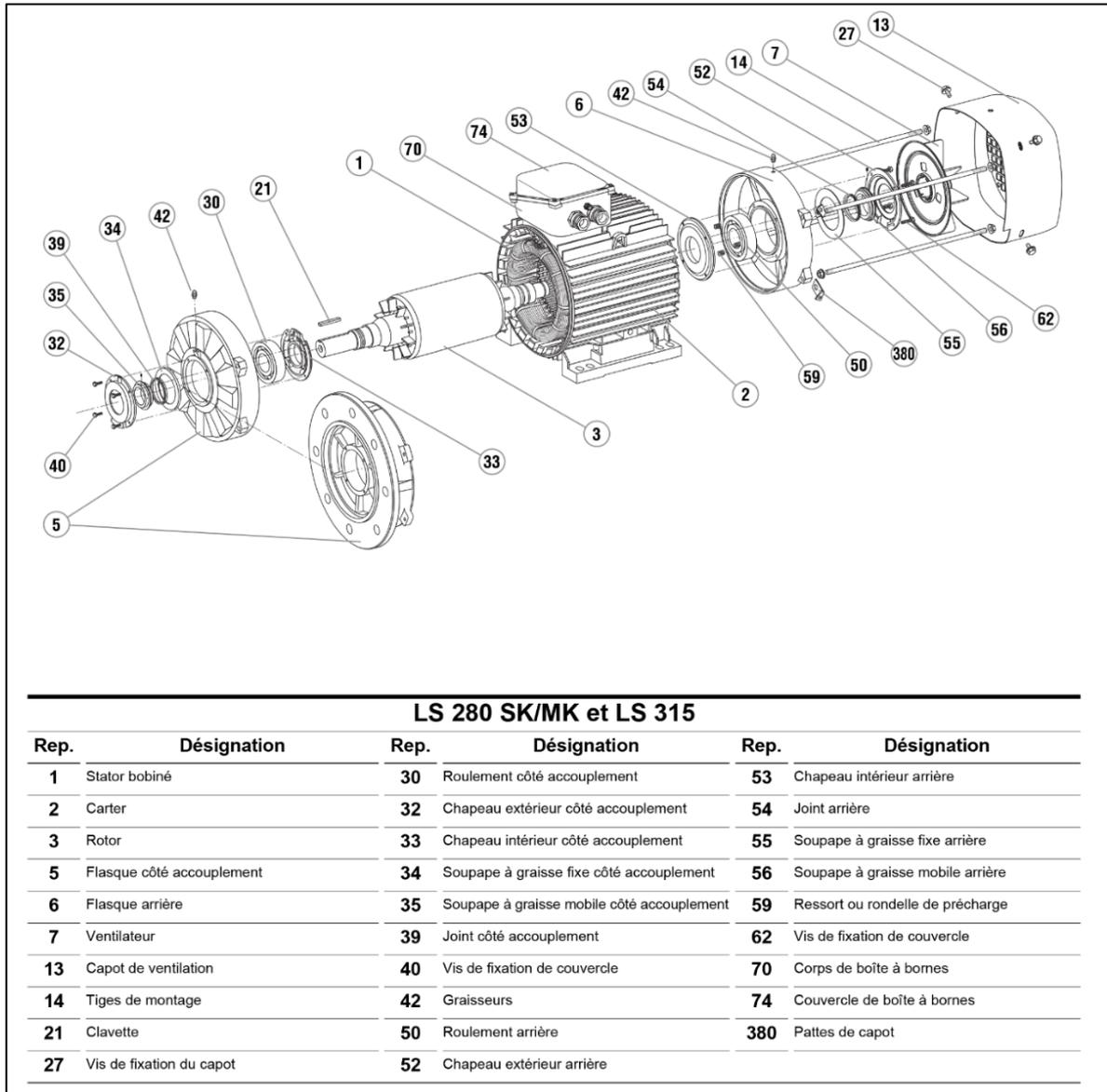
Bien que la MAS fût pendant très longtemps destinée principalement au fonctionnement moteur. Le développement de l'électronique de puissance a permis de montrer les performances très intéressantes de cette machine lorsqu'elle opère en génératrice. [15]

Dans ce chapitre, un rappel sur la machine à induction et ses composants essentiels, ainsi que son principe de fonctionnement est introduit, et une optimisation méta-heuristique, ses méthodes et ces étapes sont développées.

### I.2 Machine à induction

La machine à induction fait appel à un principe simple de champs tournant permettant un fonctionnement sans contacts électriques glissants. Ceci conduit à une machine très robuste, à l'entretien aisé, qui convient aujourd'hui très bien dans les applications en vitesse variable.

La machine à induction se comportant comme un transformateur à couplage par champ tournant et à secondaire en court-circuit [16], et elle est composée de deux parties essentielles, une partie fixe appelée inducteur ou bien stator, c'est la partie dans laquelle l'alimentation de tension est connectée, et une partie rotative appelée induit ou rotor (figure 1-1).



*Figure I-1 : Différentes parties d'une machine à induction marque LEROY-SOMER [17].*

Le stator est un anneau de tôles encochées à l'intérieur de la machine portant un enroulement triphasé [16], qui est presque toujours relié à la source.

Le rotor est un anneau de tôles rainuré à l'extérieur, séparé du stator par un entrefer étroit d'épaisseur constant. [16]

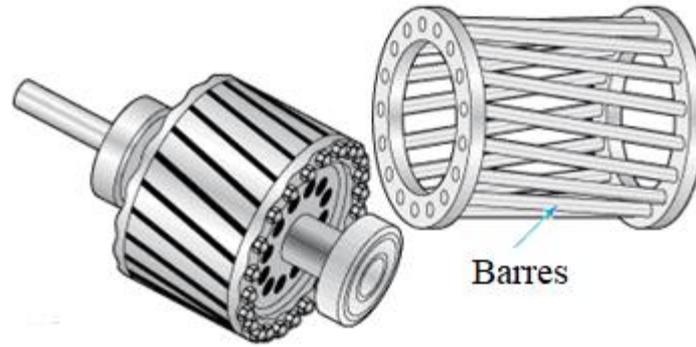


Figure I-2 : Rotor à cage [18]

### I.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur les lois de l'induction, la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit. Ce fonctionnement est reposé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $N_r$  différente du synchronisme, l'application de la loi de Faraday à un des roulements rotoriques montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice  $e = - \frac{d\varphi}{dt}$  qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces de Laplace ( $dF^{\rightarrow} = i \cdot dL^{\rightarrow} \wedge B^{\rightarrow}$ ) s'exerçant sur le rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine. Lorsque le champ est sinusoïdal, sa vitesse de rotation est [19] [20]:

$$\text{Avec } N_s = f/p \text{ en tr/s ou } N_s = 60f/p \text{ en tr/min}$$

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $N_s$ ) diffère de celle du rotor ( $N_r$ ), c'est à dire lorsque  $N_s \neq N_r$ , car dans le cas contraire, c'est-à-dire lorsque  $N_s = N_r$ , le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique [3].

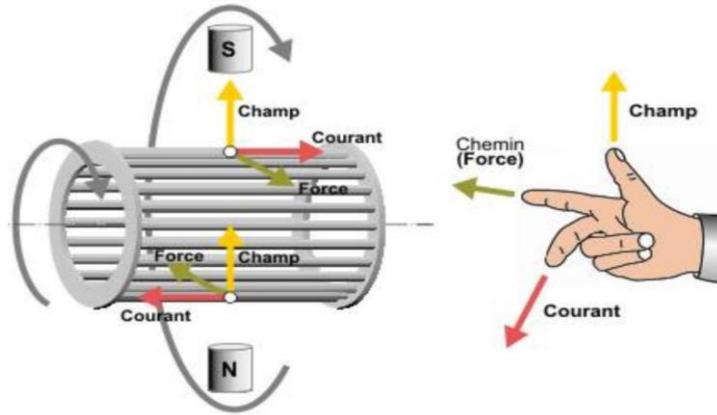


Figure I-3 : Principe de fonctionnement des machines à induction [21].

### I.3.1 Fréquence rotorique

Si le rotor tourne à la vitesse  $\Omega_r$ , il est balayé par le flux entraîné à la vitesse  $\Omega_s - \Omega_r$  donc les forces électromagnétiques et les courants induits ont pour pulsation [22] :

$$\omega_r = g \cdot \omega_s$$

Donc la fréquence rotorique :

$$f_r = g \cdot f_s$$

### I.3.2 Différents régimes de fonctionnement de la machine asynchrone

La machine asynchrone peut fonctionner en trois régimes à savoir la valeur de glissement  $g$  [22] :

-  $0 \leq g \leq 1$  : ( $0 \leq N_r \leq N_s$ )

La machine fonctionne en moteur.

-  $-\infty \leq g \leq 0$  : ( $N_r > N_s$ )

La machine fonctionne en génératrice

-  $g > 1$  : ( $N_r < 0$ )

La machine fonctionne en frein.

Avec  $N_s$  la vitesse du champ tournant (Synchronisme) en (tr/min),  $N_r$  la vitesse du rotor en (tr/min).

### I.3.3 Bilan de puissance

Afin de comprendre le fonctionnement détaillé d'une machine asynchrone il est essentiel d'étudier la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique en suivant le bilan de

la puissance active qu'elle absorbe. Ainsi, lorsqu'on alimente la machine, elle absorbe une puissance active notée  $P_a$ , dont cette puissance se devise dans les différentes parties de la machine comme pertes et puissances.

Au niveau des enroulements statoriques, ces pertes sont par effet de joule notée  $P_{js}$ , et d'autres dans le circuit ferromagnétique par hystérésis appelées pertes de fer notées  $P_{fs}$ . Le reste de la puissance absorbée se transmise à l'induit par induction à travers l'entrefer notée  $P_{tr}$ .

La puissance arrivée à l'induit  $P_{tr}$  est aussi soumise à des pertes par effet de joules  $P_{jr}$ , et pertes de fer  $P_{fer}$ , le reste de la puissance transmise au rotor se transforme à une puissance mécanique  $P_m$  qui va être soumise à son tour à des pertes mécaniques  $P_{méca}$  qui sont causées par des frottements visqueux et de la ventilation. Une grande partie de la puissance mécanique se transforme en puissance utile  $P_u$ , qui entraînera ensuite la machine.

Ce bilan peut être illustré dans la figure suivante :

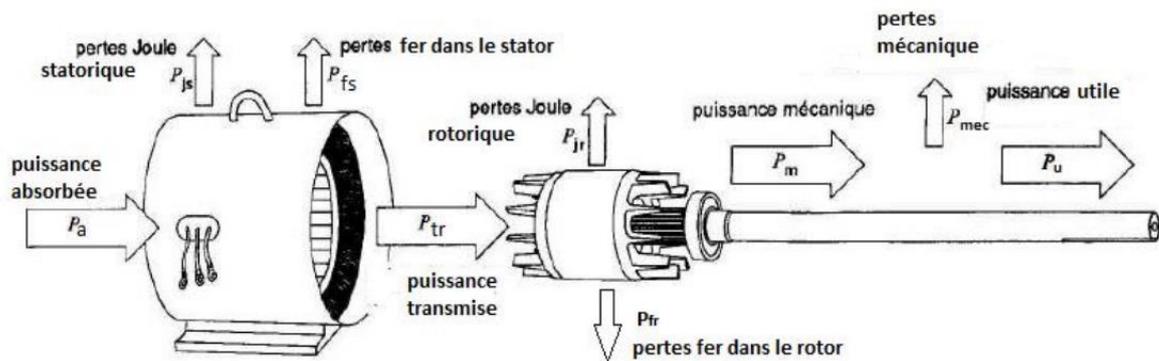


Figure I-4 : Schéma représentatif du bilan de puissance d'une machine asynchrone [23].

On donne :

$$P_a = \sqrt{3} U_s \cdot I_s \cos \varphi$$

$$P_{js} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2$$

$$P_{tr} = P_a - (P_{js} + P_{fs}) = C_{em} \cdot \Omega_s$$

$$P_{jr} = g \cdot P_{tr}$$

$$P_m = P_{tr} - (P_{jr} + P_{fr}) = P_{tr} \cdot (1 - g)$$

On appelle l'ensemble des pertes mécaniques et les pertes par effet joule dans le rotor des pertes collectives  $P_c$

$$P_c = \text{pertes mécaniques} + \text{pertes fer dans le rotor}$$

Le rotor tourne à la vitesse  $\Omega_r$  et transmis à la charge une puissance utile  $P_u$ , l'action de cette force engendre le couple utile

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega_r}$$

$$P_u = P_m - P_{mec}$$

- Les forces qui s'exercent sur le conducteur du rotor tournent à la vitesse  $\Omega$ , elles glissent sur le rotor, qui lui fait tourner à la vitesse  $\Omega_r$  on définit le couple électromagnétique.

$$C_{em} = \frac{P_{tr}}{\Omega_s} = \frac{P_m}{\Omega_r}$$

- Le rendement  $\eta$  est une grandeur qui exprime la performance d'une machine asynchrone, elle est définie comme étant le rapport entre la puissance utile et la puissance absorbée.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a}$$

### I.3.4 Variation des paramètres de la machine à induction

En pratique, les paramètres des machines électriques dépendent du point de fonctionnement et évoluent au cours du temps, principalement en fonction de l'état magnétique de la machine et de sa température [1].

#### a. Variation des résistances

La variation des résistances statoriques et rotoriques est due principalement à deux effets :

- **Effet thermique :** La résistivité des matériaux conducteurs (enroulements et barres) varie en fonction de la température, approximativement, par la relation linéaire [1] :

$$R = R_0(1 + \alpha T)$$

Avec :  $R_0$  est la résistance du matériau à 0 degrés Celsius,  $\alpha$  est le coefficient de température dépendant du matériau et  $T$  est la température exprimée en degrés Celsius.

- **Effet pelliculaire** : La répartition non homogène de la densité de courant dans les conducteurs est à l'origine de l'apparition de l'effet de peau, problème très marqué au niveau du rotor dans les machines à cage (conducteurs massifs). Ce phénomène est d'autant plus important que la fréquence de fonctionnement est élevée, ce qui entraîne l'augmentation des résistances. [24]

### **b. Variation des inductances**

La variation des inductances, quant à elle, est due à la saturation magnétique des matériaux ferromagnétiques de la machine, à cause de la non-linéarité du circuit magnétique.

Alors, les inductances ont tendance à diminuer lors de la saturation de la machine, et leurs valeurs maximales peuvent être définies dans des zones magnétiquement linéaires [1].

## **I.4 Méthodes d'optimisation**

L'optimisation sert à modéliser un problème réel sous forme d'une fonction mathématique appelée fonction objective, Trouver les valeurs des paramètres qui en maximisant en minimisant cette fonction.

### **I.4.1 Étapes de l'optimisation**

#### **a. Analyse et formulation du problème**

Cette étape consiste à identifier les différentes variables, leur nature et leur domaine d'étude. Ensuite définir l'objectif du problème, enfin de terminer par la définition d'éventuelles contraintes.

#### **b. Modélisation mathématique du problème**

Cette étape recule la formulation d'un fonction mathématique appelée fonction objective qui décrit le problème aussi de mettre les contraintes sous forme mathématique.

#### **c. Méthode de résolution du problème**

Afin de pouvoir résoudre le problème, il faut bien choisir la méthode adéquate au type de ce problème et puis appliquer les méthodes d'optimisation qui servent à résoudre ce dernier.

## I.4.2 Problèmes d'optimisation

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche, parmi un ensemble de solutions possibles  $S$  (appelé aussi espace de décision ou espace de recherche), de la (ou des) solution(s)  $x^*$  qui rend(ent) minimale (ou maximale) une fonction mesurant la qualité de cette solution. Cette fonction est appelée fonction objectif ou fonction coût. Si l'on pose  $f : S \rightarrow \mathbb{R}$  la fonction objectif à minimiser (respectivement à maximiser) à valeurs dans  $\mathbb{R}$ , le problème revient alors à trouver l'optimum  $x^* \in S$  tel que  $f(x^*)$  soit minimal (respectivement maximal). [25]

Pour résoudre un problème d'optimisation, il sera intéressant de rechercher la meilleure solution possible à ce problème, c'est-à-dire l'optimum global. Cependant, il peut exister des solutions intermédiaires, qui sont également des optimums, mais uniquement pour un sous-espace restreint de l'espace de recherche. Cette notion est illustrée dans la figure II-5. La seule hypothèse faite sur  $S$  est qu'il s'agit d'un espace topologique, i.e. sur lequel est définie une notion de voisinage. Cette hypothèse est nécessaire pour définir la notion de solutions locales du problème d'optimisation. Il est possible de définir un optimum local (relativement au voisinage  $V$ ) comme la solution  $x^*$  de  $S$  telle que  $f(x^*) \leq f(x); \forall x \in V(x^*)$  [25].

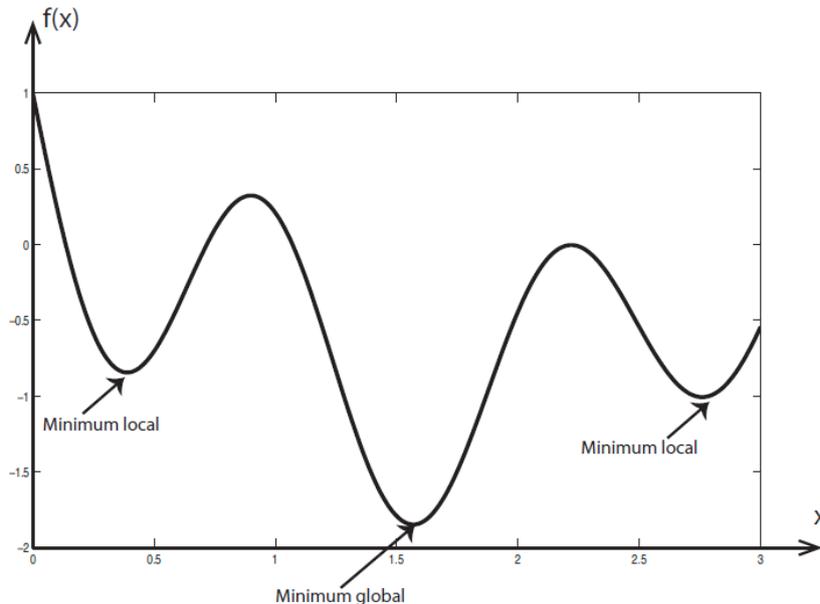


Figure I-5 : Différence entre un optimum global et des optima locaux [25].

## I.4.3 Classification des méthodes d'optimisation

La résolution d'un problème d'optimisation est réalisée à l'aide des méthodes d'optimisation dont la classification est illustrée dans la figure II-6.

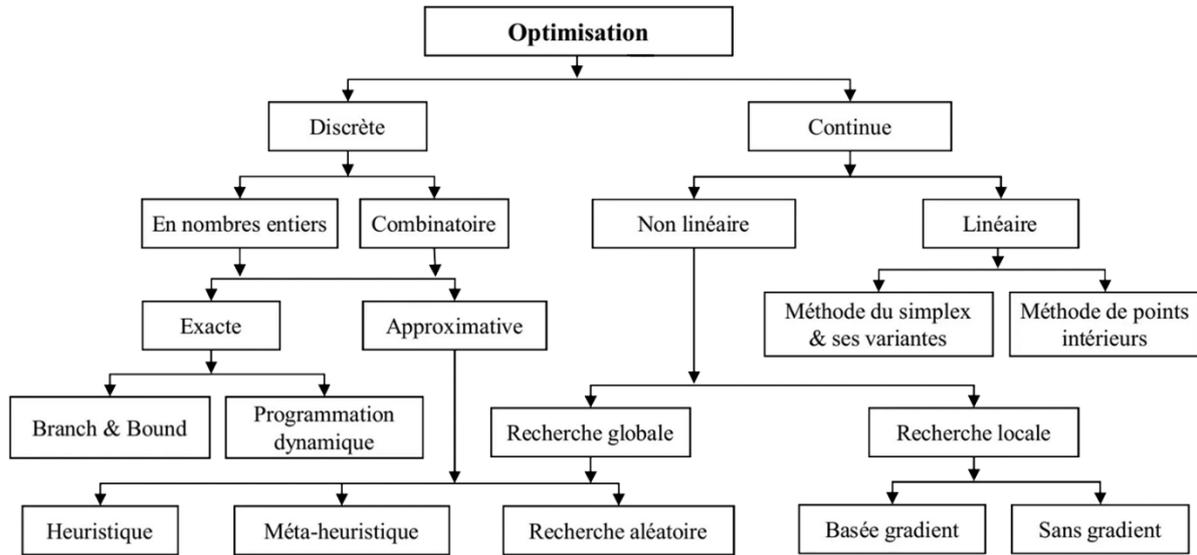


Figure I-6 : Classification des méthodes d'optimisation [25].

### I.5 Optimisation par les Méta-heuristiques

Une méta-heuristique est une stratégie (règle) de choix pilotant une heuristique (introduite initialement dans le contexte de la méthode taboue). [26]

Une heuristique définit la méthode approchée conçue pour un problème particulier pour produire des solutions non nécessairement optimales avec un temps de calcul raisonnable. [27]

La recherche d'optimum par une heuristique se base sur deux principes [27]:

- Intensification (exploitation) : permet d'examiner en profondeur une zone particulière de l'espace de recherche.
- Diversification (exploration) : permet d'orienter la recherche vers de nouvelles zones prometteuses dans l'espace de recherche.

Une recherche heuristique efficace nécessite un bon compromis entre intensification et diversification. [27]

Nous pouvons classer les algorithmes des métaheuristiques dans la figure suivante :

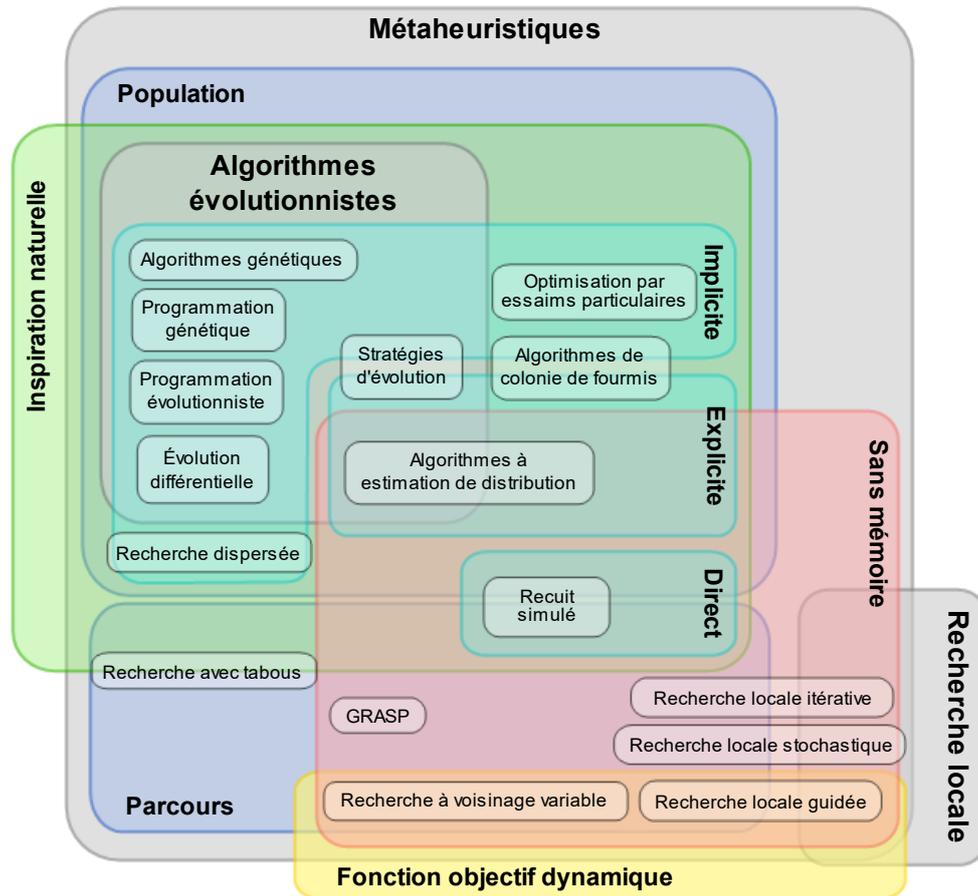


Figure I-7 : Classification des algorithmes métaheuristiques [28].

### I.6 Optimisation par essaims de particules

L'optimisation par essaims de particules (particles swarm optimization PSO) a été développée par Eberhart et Kennedy en 1995 est une forme d'intelligence de population (groupe, essaim, ...) dans laquelle le comportement biologique social des oiseaux, des poissons est simulé pour imiter la nature dans la recherche d'optimums dans les problèmes d'optimisation. [29]

#### I.6.1 Principe

Quand un groupe cherche de la nourriture, les individus du groupe se dispersent pour explorer l'environnement et se déplacent indépendamment l'un de l'autre. Chaque individu a un certain degré de liberté qui lui permet de se déplacer d'une manière aléatoire pour bien explorer son environnement. En plus chaque individu reçoit des informations de la part des

autres individus concernant la présence de la nourriture ce qui permet d'orienter son mouvement dans la direction où la nourriture lui apparaît abondante. Et comme ça, tôt ou tard toute la population se trouve centrée dans la région où la nourriture est abondante. Donc l'optimisation par essaims de particules imite ce comportement pour trouver une solution optimale ou proche de l'optimale le plus rapidement possible sans tester tous les points de l'espace des solutions. [29]

Chaque particule est dotée d'une certaine mémoire pour garder la meilleure de ses solutions déjà visitées lors de son déplacement. De plus, chaque particule a le pouvoir de communiquer sa solution avec les autres particules [30].

La particule se déplace d'un mouvement combiné de deux parties : une partie aléatoire, et l'autre est orientée avec un certain pas aléatoire vers la position où la meilleure solution (globale ou locale) est détectée. Ainsi, l'ensemble des particules va converger vers la solution optimale globale du problème traité [30].

### **I.6.2 Avantages et inconvénients de la technique PSO**

L'optimisation par essaim particulaire présente un avantage certain dans le sens où elle permet une exploration aléatoire de l'espace de solution. Sa simplicité à mettre en œuvre et son exécution conduit à l'obtention de très bons résultats, rapidement avec peu de paramètre à ajuster. Elle est caractérisée par sa convergence rapide, ce qui peut conduire les algorithmes à stagner dans un optimum local [31]. Bien que le PSO trouve de bonnes solutions dans un temps beaucoup plus court que d'autres algorithmes, l'amélioration de la qualité des solutions ne peut être garantie en augmentant le nombre d'itération. L'algorithme PSO a deux inconvénients principaux [31] :

- Le premier inconvénient est que l'essaim peut prématurément converger.
- Le deuxième inconvénient est que les approches stochastiques ont un problème de dépendance tout changement d'un de leurs paramètres peut avoir un effet sur le fonctionnement de l'algorithme tout comme sur la solution obtenue.

### **I.6.3 Caractéristiques et modèle mathématique du PSO**

Un essaim de particules est caractérisé par :

- ✓  $N$  : Le nombre de particules.
- ✓  $V_{\max}$  : La vitesse maximale de déplacement.
- ✓ La topologie et la taille du voisinage d'une particule.
- ✓  $C_1$  : L'inertie d'une particule.

- ✓  $C_2, C_3$  : Les coefficients de confiance qui pondèrent le comportement conservateur (ie. La tendance à retourner vers la meilleure solution visitée) et le panurgisme (ie. La tendance à suivre le voisinage).

Une particule  $i$  est caractérisée à l'instant  $t$  par :

- ✓  $X_i(t)$  : Sa position dans l'espace de recherche.
- ✓  $V_i(t)$  : Sa vitesse.
- ✓  $X_{pbest(i)}$  : Sa meilleure position déjà visitée et son indice de performance (fitness) correspondant.
- ✓  $X_{vbest(i)}$  : La meilleure position dans son voisinage ou globale et son indice de performance (fitness) correspondant.
- ✓  $P_{best(i)}$  : la valeur fitness de sa meilleure solution.
- ✓  $V_{best(i)}$  : la valeur de fitness de la meilleure solution connue du voisinage.

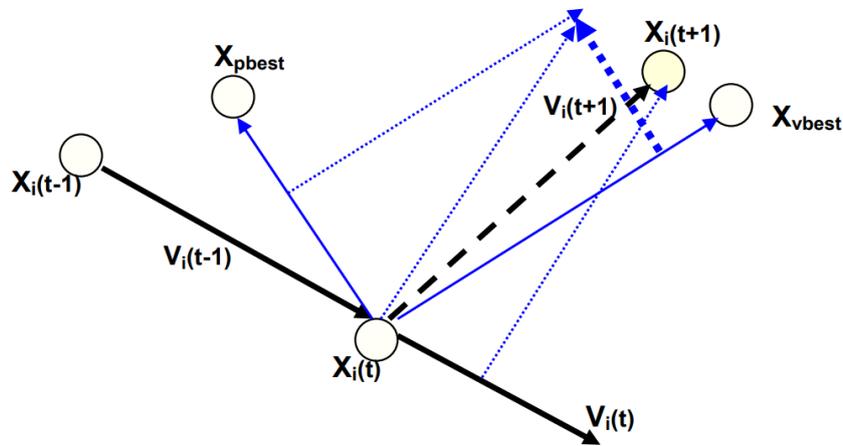


Figure I-8 : Le déplacement de la  $i^{\text{ème}}$  particule.

L'équation de la vitesse :

$$V_i(t + 1) = C_1 * V_i(t) + C_2 * \text{random} * (X_{pbesti} - X_i) + C_3 * \text{random} * (X_{Gbest} - X_i)$$

L'équation du déplacement :

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1)$$

Où :

- *random* est un nombre compris entre 0 et 1, sélectionné aléatoirement.
- $C_2$  et  $C_3$  égales à 2 dans la version originale.

### **I.6.4 Configuration de la méthode**

#### **a. Initialisation de l'essaim et nombre de particules**

La quantité de particules allouées à la résolution du problème dépend essentiellement de deux paramètres :

- La taille de l'espace de recherche et le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre.

#### **b. Topologie du voisinage**

La topologie du voisinage défini avec qui chacune des particules va pouvoir communiquer pour la transmission des coordonnées de sa meilleure position déjà visitée. Le choix du voisinage définit le choix de la stratégie de recherche [22] [23].

Il y a deux classes de voisinage : le voisinage global et le voisinage local.

- Le voisinage global : C'est le voisinage adopté dans la version de base du PSO, ou chaque particule considère la totalité de l'essaim comme voisinage, donc la meilleure particule représente le minimum global de l'essaim et sa position va être transmise vers toutes les autres particules. Le problème avec ce voisinage c'est le risque de converger vers un minimum local si l'essaim n'est pas suffisamment grand [30].
- Le voisinage local : Pour éviter qu'une seule particule possède une grande influence sur toutes les autres, le voisinage local limite la communication entre les particules et définit le canal de communication. Il existe de nombreuses combinaisons proposées dont les suivantes sont les plus utilisées :
  - Topologie en étoile : chaque particule est reliée à toutes les autres, ie. L'optimum du voisinage est l'optimum global du l'essaim
  - Topologie en anneau : chaque particule est reliée à n particules (en général,  $n = 3$ ), c'est la topologie la plus utilisée
  - Topologie en rayon : les particules ne communiquent qu'avec une seule particule centrale
  - Topologie de Von Neumann (topologie en cube) : chaque particule communique avec les autres particules placées sur les sommets des arrêts adjacents.
  - Topologie de sous-ensembles : chaque sous-ensemble désigne une particule pour la communication avec les autres sous-ensembles.

Chaque structure possède des propriétés propres à un problème bien déterminé. L'hybridation des structures améliore la convergence de l'algorithme.

### c. Facteur d'inertie

Le facteur d'inertie  $C_1$  est très important car c'est lui qui fixe le compromis entre la recherche locale et la recherche globale. La taille du facteur d'inertie influence directement la taille de l'hyperm espace exploré. Les études faites sur ce problème [24] proposent des valeurs entre 0.4 et 1.2.

La valeur ce  $C_1$  peut être constante ou dynamique pendant l'évolution du problème.

### d. Coefficients de confiance

Les variables de confiance pondèrent les tendances de la particule à vouloir suivre son instinct de conservation ou son panurgisme. [32]

$C_2$  et  $C_3$  sont des constantes positives déterminées de façon empirique et suivant la relation:

$$C_2 + C_3 \leq 4$$

On notera ici un point important, à savoir que les deux coefficients aléatoires sont recalculés pour chaque dimension. Ceci va nous donner l'interprétation géométrique du choix de la nouvelle vitesse. [30]

Le premier rectangle (Figure I-8) plus précisément hyper parallélépipède), appelé  $P_{proximité}$ , nous donne toutes les positions possibles pour le terme aléatoire correspondant au retour à proximité de la meilleure performance de la particule. L'une d'elles est choisie au hasard, selon une distribution uniforme.

De la même manière, une autre position est choisie dans un hyper parallélépipède ( $V_{proximité}$ ) autour de meilleure performance des voisines.

L'utilisation d'hyper parallélépipèdes implique en effet un biais, puisque le domaine des choix possibles dépend du système de coordonnées. De plus, il s'agit d'une forme assez arbitraire, qui résulte seulement de la facilité de codage d'une distribution uniforme sur un intervalle.

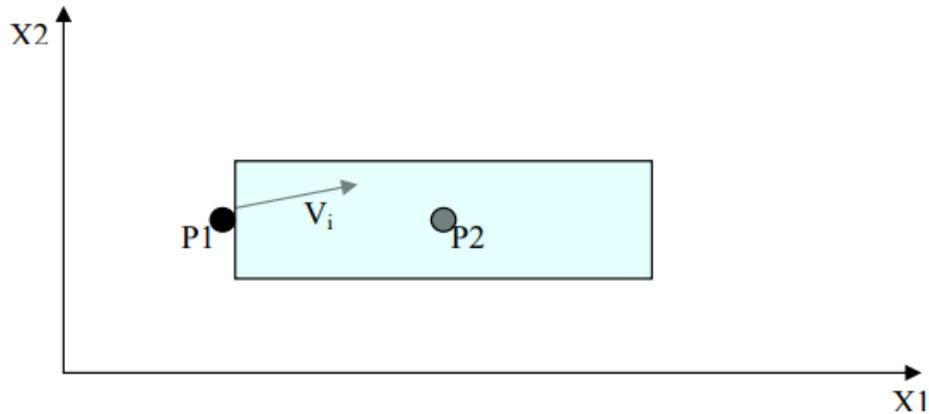


Figure I-9 : La zone probable du déplacement suivant R1 ou R2 [30].

### e. Vitesse maximale

Afin d'éviter que les particules ne se déplacent trop rapidement dans l'espace de recherche, passant éventuellement à côté de l'optimum, il peut être nécessaire de fixer une vitesse maximale (notée  $V_{max}$ ). [27]

### f. Notion de confinement

Lors de l'évolution de l'essaim, il peut arriver qu'une particule sorte d'espace de recherche initialement défini. C'est sans importance si la valeur de sa position est encore calculable sans « planter » le programme informatique, mais il suffit, par exemple, d'avoir à évaluer la racine d'un nombre négatif ou une division par zéro pour que cela pose problème. Plus généralement, on souhaite souvent rester dans un espace de recherche fini donné. Par conséquent, on ajoute un mécanisme pour éviter qu'une particule sorte de cet espace. Le plus fréquent est le confinement d'intervalle. De plus, on complète souvent le mécanisme de confinement par une modification de la vitesse, soit en remplaçant la composante qui pose problème par son opposée, souvent pondérée par un coefficient inférieur à 1, soit, tout simplement, en l'annulant. [27]

### g. Critères d'arrêt

Comme indiqué précédemment, la convergence vers la solution optimale globale n'est pas garantie dans tous les cas de figure même si les expériences dénotent la grande performance de la méthode. De ce fait, il est fortement conseillé de doter l'algorithme d'une porte de sortie en définissant un nombre maximum d'itération.

L'algorithme doit alors s'exécuter tant que l'un des critères de convergence suivant n'a pas été atteint :

- Nombre d'itération Max a été atteint.
- La variation de la vitesse est proche de 0
- Le fitness de la solution est suffisant.

### I.6.5 Concept de la version originale

La version originale telle que développée par ses auteurs comprend un concept très simple qu'est représenté dans l'organigramme suivant :

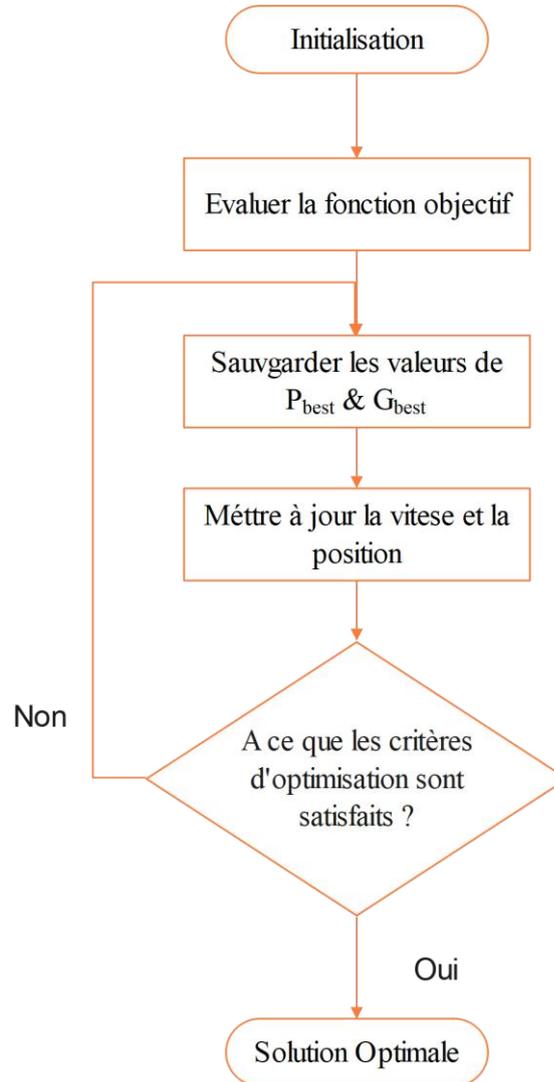


Figure I-10 : Organigramme de la version originale de PSO

L'organigramme précédent peut-être traduit en pseudo-code suivant :

```
%%Initialisation  
Pour chaque particule  
    Initialiser la position
```

```
Initialiser la vitesse
Evaluer la fonction objectif
Sauvegarder  $G_{best}$  &  $P_{best}$ 
Fin Pour
%% Boucles de recherches
Pour T =1 jusqu'au Maximum d'itérations
  Pour chaque particule
    Si  $f(P_{besti}) < f(G_{best})$ 
       $G_{best} = P_{best}$ 
    Fin Si
    Mettre à jour la vitesse  $V$  et la position  $X$ 
    Si  $V_i(x_i) > V_{max}$ 
       $V_i(x_i) = V_{max}$ 
    Fin Si
    Si  $V_i(x_i) > V_{min}$ 
       $V_i(x_i) = V_{min}$ 
    Fin Si
    Si  $X_i(x_i) > X_{max}$ 
       $X_i(x_i) = X_{max}$ 
    Fin Si
    Si  $X_i(x_i) > X_{min}$ 
       $X_i(x_i) = X_{min}$ 
    Fin Si
  Fin Pour
Fin Pour
```

### I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit la construction de la machine asynchrone, en décomposant la machine en trois parties distinctes, puis le principe de fonctionnement de cette machine et son démarrage qui est régie par deux grandeurs principales qui sont le couple et le courant de démarrage.

Nous avons aussi présenté les différentes méthodes d'optimisation avec une Classification suivant les problèmes traités et les techniques de recherche.

# CHAPITRE II

Techniques d'identification Des Machines à Induction

# Chapitre II

## Techniques d'identification des machines à induction

### II.1 Introduction

L'identification est le fait de reconnaître les paramètres d'un système précis, cette démarche se résume sur l'application des signaux à l'entrée de ce système et l'analyse de la sortie pour but d'obtenir un modèle mathématique qui reproduit au mieux le comportement du système, dans toutes les conditions utiles du fonctionnement de ce dernier.

Pour obtenir un modèle consistant, il est important d'exciter le système avec toutes les fréquences de sa plage de fonctionnement. Le signal d'entrée appliqué doit être riche en fréquences, de préférence appliquer un signal de séquences binaires pseudo-aléatoires (SBPA). Lorsque le système possède plusieurs entrées/sorties il est important d'appliquer des signaux décorrélés pour ne pas introduire de biais d'identification [15].

Dans ce travail nous avons introduit l'identification des paramètres électriques et mécanique de la machine, qui sont rarement fournies par le constructeur. L'intérêt de faire cette identification est d'avoir un modèle mathématique complet qui traduit le fonctionnement de cette machine qui pourrait servir pour le développement et le diagnostic.

En ce chapitre nous intéresserons à présenter les étapes et les méthodes utilisées pour l'identification des paramètres des machines à induction.

### II.2 Étapes d'identification

Les étapes de la procédure d'identification (modélisation mathématique) sont résumées comme suit [22] :

#### II.2.1 Extraction des données

Durant cette phase, des mesures sont effectuées sur les variables censées caractériser le système, ces variables peuvent être des variables externes qui agissent sur le système, des variables internes qui traduisent l'état ou la réponse du système. Il existe souvent des perturbations non mesurables qui agissent sur ce dernier rendant plus difficile sa modélisation.

Dans la machine asynchrone on cite le courant, la tension et l'angle de déphasage entre eux

### **II.2.2 Choix de la structure du modèle**

Il s'agit de définir d'une façon formelle la relation expliquant le fonctionnement du système. Cette relation correspond à une famille de fonctions mathématiques dont une seule correspond au modèle recherché.

### **II.2.3 Choix du critère d'estimation paramétrique**

C'est le choix de la fonction objectif (fonction coût) dont l'optimisation permet de déterminer la structure du modèle de façon unique, ce critère est l'écart entre la sortie du système (mesurée) et celle du modèle.

### **II.2.4 Estimation paramétrique**

Elle s'agit de trouver la valeur des paramètres du modèle choisi au préalable, permettant la satisfaction d'un critère de performance donné (minimisation de la fonction objectif). En général elle se fait par ordinateur, les mesures prélevées sont des échantillons et le modèle est discret même si le système est continu.

### **II.2.5 Validation du modèle**

C'est une procédure qui permet d'évaluer la fidélité du modèle et qu'il est assez bon. Pendant cette phase le modèle est testé avec des données non utilisées pendant la phase d'identification.

Ces choix doivent être modifiés si la vérification donne de grande différence entre la réponse du système et celle du modèle, les causes peuvent être différentes, le modèle ne représente pas au mieux la physique du système, le critère n'est pas bien adapté à l'exigence demandé et l'algorithme d'optimisation n'est pas performant à cause du temps de calcul ou des problèmes de convergence.

La figure (2-1) montre l'organigramme de la procédure d'identification [22]:

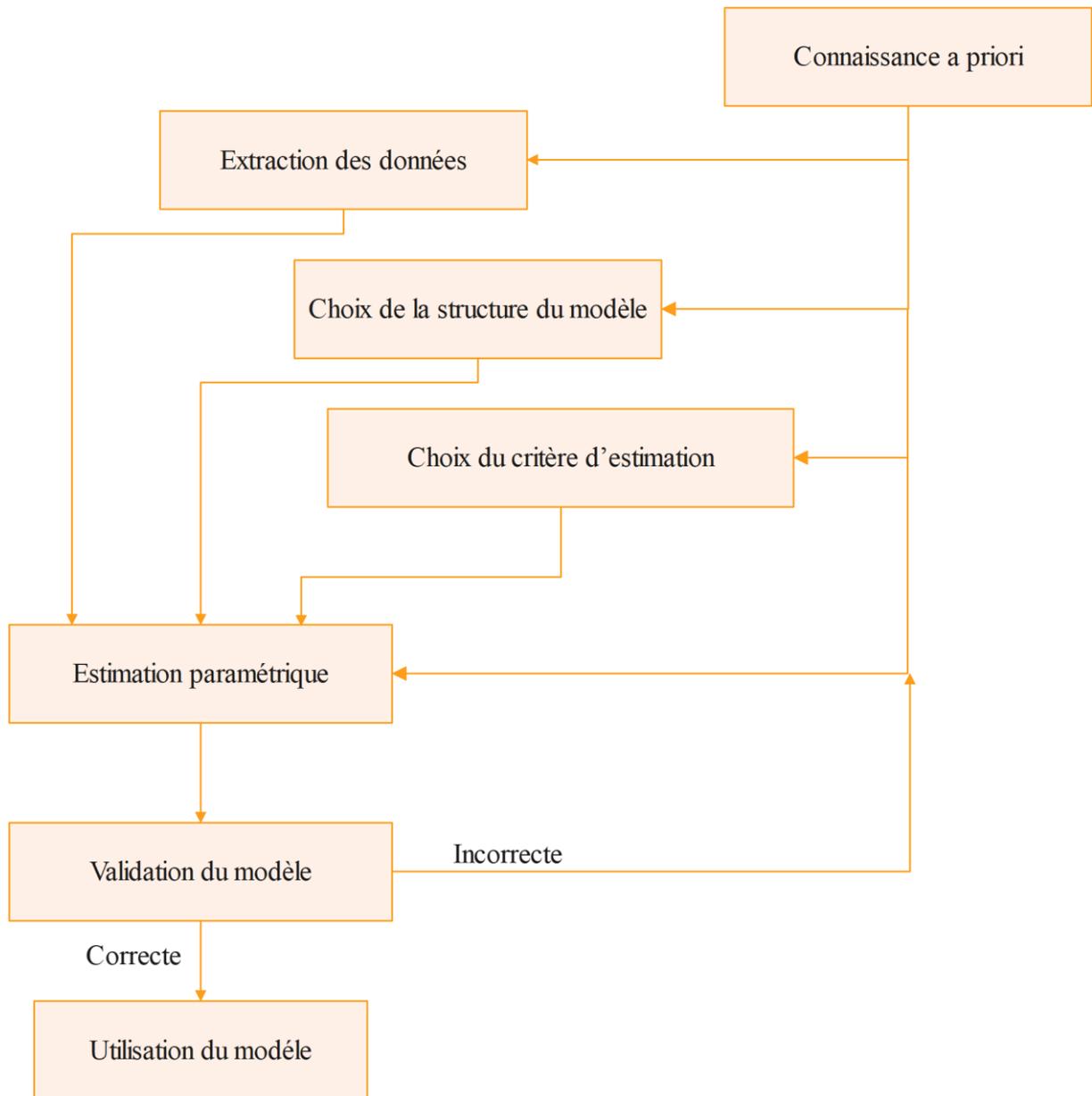


Figure II-1 : Procédure d'identification d'un système

## II.3 Méthodes d'identification des paramètres d'une machine asynchrone

### II.3.1 Méthode de la plaque signalétique

Cette méthode, permet une estimation grossière très approximative, directe et rapide des paramètres électriques de la machine asynchrone tout en employant les indications nominales de la plaque signalétique telle que :  $V_s$ ,  $I_s$ ,  $f$ ,  $\cos(\varphi)$  et  $g$ . Cette première approche est appropriée à l'identification de la MAS triphasée aussi bien à rotor bobiné (à bagues) qu'à rotor à cage d'écureuil. [1]

### II.3.2 Méthode du catalogue

Que le constructeur fournit à l'utilisateur à sa demande, les données nécessaires sont le courant et le couple de démarrage, la vitesse, la fréquence, le facteur de puissance et le rendement correspondant au point de fonctionnement nominal. [33]

### II.3.3 Méthode des essais classiques

La méthode classique est la plus utilisée dans l'électrotechnique, en se basant sur le modèle mathématique de Park défini avec des paramètres inductifs et résistifs que nous devons identifier au préalable par des essais expérimentaux ; autrement dit, les essais à vide et les essais à rotor bloqué.

### II.3.4 Essai de ralentissement

Cet essai permet de déterminer les paramètres mécaniques (moment d'inertie, coefficient de frottements) de la machine asynchrone. C'est une méthode qui est applicable pour tous les types de machines tournantes. On alimente la machine par sa tension nominale et on la laisse tourner à vide. Ensuite on coupe l'alimentation et l'évolution de la vitesse en fonction du temps est enregistré à l'aide d'un oscilloscope à mémoire. [34]

### II.3.5 Méthode de séparation des pertes

Cette méthode consiste à alimenter la machine à vide sous tension variable et mesurer le courant statorique et la puissance active. On fait varier la tension sur une plage où la vitesse doit demeurer constante afin de conserver la constance des pertes mécaniques qui sont tributaires de la vitesse. A fréquence statorique constante, les pertes fer varient proportionnellement au carré de la tension d'alimentation.

En traçant la variation de  $(P_0 - P_{js0})$  en fonction du carré de la tension qui est pratiquement une droite, on obtient les pertes mécanique  $P_{mec}$  qui sont indépendantes de la tension. [34]

### II.3.6 Méthode itérative

Cette méthode est basée sur un principe d'itération jusqu'à l'obtention de convergence lorsque les conditions imposées sont satisfaites, c'est-à-dire pour satisfaire les puissances mesurées à vide et en court-circuit, cette méthode utilise les mêmes essais que la méthode classique et rassemble des expressions sous forme itérative de différents paramètres du schéma électrique équivalent. [33]

### II.3.7 Méthodes des Moindres carrés

La méthode de loin la plus connue est la méthode des moindres carrés, développée par Gauss. Elle est applicable quel que soit le problème, linéaire ou non linéaire. Elle est basée sur la minimisation d'un critère quadratique en utilisant un algorithme, généralement d'ordre 2. Le principe de la méthode est basé sur la minimisation d'un critère fonction de l'écart entre la réponse du processus réel et la réponse du modèle du processus. Cette minimisation est effectuée à l'aide d'un algorithme d'optimisation qui retournera alors une estimation de la valeur des paramètres [35] tel que :

#### a. Algorithme du gradient

Cette méthode consiste à la recherche itérative du vecteur des paramètres ( $\Theta$ ), en minimisant le critère  $J$  aussi par l'utilisation des dérivées du critère par rapport à chacun des paramètres, La méthode du gradient présente l'intérêt d'être facile à mettre en œuvre, lorsque le point initial est situé loin du point optimum, cette méthode permet de diminuer rapidement la valeur du critère, En contrepartie, la convergence devient de plus en plus lente en se rapprochant du minimum car le vecteur gradient tend à osciller. [33]

#### b. Algorithme de Gauss-Newton

La méthode de Gauss-Newton est efficace lorsqu'on se trouve dans le voisinage du minimum (rapide dans sa convergence vers l'optimum), mais se trouve instable lorsque l'initialisation n'est pas au voisinage de l'optimum. [33]

#### c. Algorithme Levenberg-Marquardt

Les deux méthodes précédentes présentent l'inconvénient de ne pas converger lorsque le point initial est loin du minimum recherché L'algorithme Levenberg-Marquardt lève cet inconvénient en combinant les avantages de la méthode du gradient et celle de Gauss Newton, cette méthode consiste à rechercher le vecteur de paramètre par l'utilisation des dérivées premières et secondes du critère par rapport à chacun des paramètres. [33]

### II.3.8 Méthodes d'optimisation par des algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnistes ou algorithmes évolutionnaires (EC : Evolutionary Computation), sont une famille d'algorithmes s'inspirant de la théorie de l'évolution «

darwinienne » pour résoudre des problèmes divers. Selon la théorie du naturaliste Charles Darwin, énoncée en 1859 [36], l'évolution des espèces est la conséquence de la conjonction de deux phénomènes : d'une part la sélection naturelle qui favorise les individus les plus adaptés à leur milieu à survivre et à se reproduire, laissant une descendance qui transmettra leurs gènes et d'autre part, la présence de variations non dirigées parmi les traits génétiques des espèces (mutations). Le terme Evolutionary Computation englobe une classe assez large de métaheuristiques telles que les algorithmes génétiques [37], les stratégies d'évolution [38], la programmation évolutive [39], et la programmation génétique [40]. La figure II-2 décrit le squelette d'un algorithme évolutionnaire type, commun à la plupart des instances classiques d'EAs.

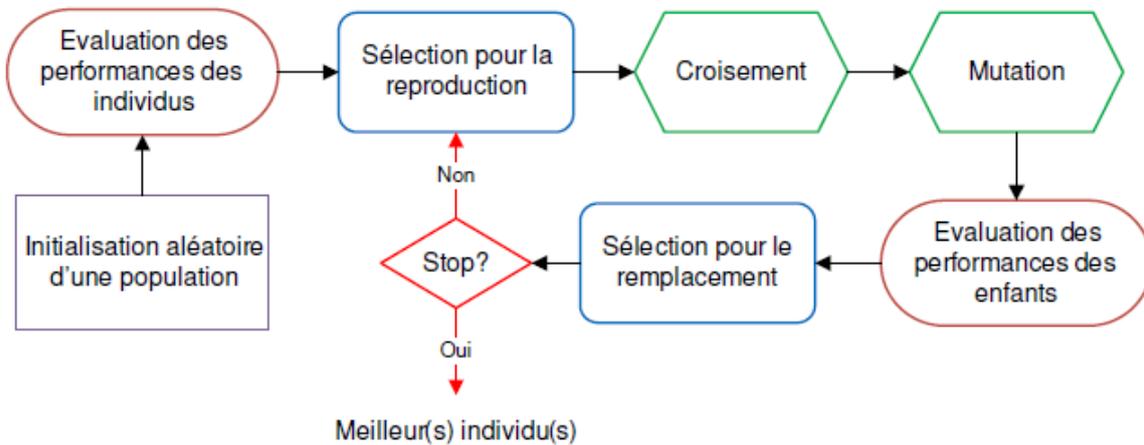


Figure II-2 : Principe d'un algorithme évolutionnaire (EA) [41]

### II.3.9 Méthode fréquentielle

La méthode nécessite l'utilisation d'un variateur de vitesse (convertisseur statique) qui permet d'obtenir des tensions à fréquence variable. Cependant l'acquisition des courants et des tensions nécessite un système de mesure sophistiqué. [42]

### II.3.10 Méthode des éléments finis

Cette méthode se base essentiellement sur la solution de l'équation électromagnétique en deux dimensions ou trois dimensions pour déterminer le champ et l'induction en tout point de la machine. [42]

### II.3.11 Essais fréquents en vue de l'identification de la MAS

Pour décrire le comportement fréquentiel d'une machine, il est préférable d'utiliser une approche fréquentielle plutôt qu'une approche temporelle. En effet, l'approche fréquentielle est d'une part généralement moins contraignante et présente moins de risques pour la machine lors de sa mise en œuvre par rapport à des réponses temporelles (réponse à un échelon). D'autre part, l'essai est moins sensible aux bruits de mesure puisque les signaux sinusoïdaux sont faciles à décorrélérer du bruit et il permet l'identification des systèmes d'ordres élevés. Dans ce qui suit, nous présentons des essais fréquents permettant de caractériser l'impédance équivalente de la machine en fonction de la fréquence  $Z(f)$ . [42]

### **II.3.12 Essais à tension constante et à fréquence variable**

Ces tests sont réalisés à rotor bloqué en imposant au stator, une tension sinusoïdale réduite d'amplitude fixe et de fréquence variable. Avant de réaliser les mesures, il faut vérifier que la position du rotor n'a pas d'impact sur la variation de l'impédance équivalente de la machine asynchrone. Habituellement, ces essais à très faible niveau de tension (inférieur à 1V) sont réalisés avec un analyseur d'impédance. Pour s'assurer que la chaîne de mesure (source triphasée et wattmètre monophasé) est adaptée à ces mesures, il faut également les effectuer à l'aide d'un analyseur d'impédance. [42]

### **II.3.13 Essais par la méthode SSFR ( $V/f = \text{cst}$ )**

En se basant sur l'analyse des mesures effectuées à tension constante, il paraît nécessaire de conserver le même état magnétique de la machine sur toute la bande de fréquence souhaitée afin d'identifier son comportement fréquentiel sans introduire de variations supplémentaires liées aux caractéristiques des matériaux.

Pour ce faire, on utilise la méthode SSFR (Standstill Frequency Response) ou réponse fréquentielle à l'arrêt. Cette méthode permet de déterminer les caractéristiques fréquentielles d'une machine tournante à l'arrêt. Elle consiste à acquérir les grandeurs utiles à l'identification des paramètres, en alimentant le stator de la machine par une source de tension sinusoïdale d'amplitude et de fréquence variable tout en gardant le rapport  $V/f$  constant. [42]

### **II.3.14 Essai à échelon de tension**

Cet essai est réalisé en branchant la machine, connectée en Étoile, sur une source de tension continue de sorte que les trois phases soient parcourues respectivement par  $I$ ,  $-I/2$  et  $-I/2$ .

Un échelon positif conduit à l'apparition d'un courant de la forme [33] :

$$I_{as}(t) = I_0 (1 + Ae^{-t/T^1} + Be^{-t/T^2})$$

Un échelon négatif (court-circuit de la source) donne une décroissance du courant de la forme :

$$I_{as}(t) = I_0 (Ae^{-t/T^1} + Be^{-t/T^2})$$

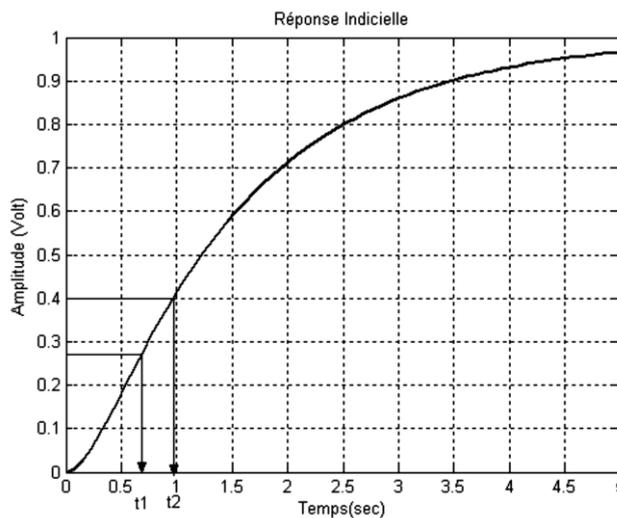
Cet essai nous permet d'identifier la constante de temps rotorique  $\tau_r$ , la constante de temps statorique  $\tau_s$  et le coefficient de dispersion  $\sigma$ .

### II.3.15 Méthode de BROÏDA

La méthode de Broïda permet d'identifier les paramètres d'un système modélisé par une fonction de transfert du premier ordre comportant éventuellement un retard. Par conséquent la fonction de transfert est de la forme [43]:

$$G(s) = \frac{e^{-\tau s}}{(1 + sT)}$$

Pour cela on relève sur la réponse indicielle  $y(t)$  les temps  $t_1$  et  $t_2$  correspondant, respectivement, à 28% et 40% de sa valeur comme l'indique la figure.



*Figure II-3 : Méthode de Broïda [43]*

La résolution d'un système de deux équations à deux inconnues conduit aux deux relations suivantes permettant d'identifier la constante de temps  $T$  et le retard  $\tau$  du système considéré.

$$T = 5.5(t_2 - t_1)$$

$$\tau = 2.8t_1 - 1.8t_2$$

### **II.4 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques méthodes d'identification les plus développées dans la littérature. Nous avons présenté et détaillé les étapes d'identification ainsi que les différentes méthodes qui seront appliquées dans le chapitre suivant, tel que les essais classiques, essai de ralentissement et méthode de séparation des pertes.

# CHAPITRE III

Partie expérimentale

# Chapitre III

## Partie expérimentale

### III.1 Introduction

Afin d'identifier les paramètres d'une machine asynchrone, des essais expérimentaux sont nécessaires, pour cela un modèle d'acquisition de données a été conçu pour but d'obtenir les données de courant, tension et déphasage des trois phases en temps réel.

Dans ce chapitre nous présentons le milieu expérimental, puis une estimation des paramètres basée sur la méthode de la plaque signalétique. Ensuite nous réalisons des calculs basés sur les données d'acquisition afin de déterminer les paramètres de la machine.

### III.2 Présentation du milieu expérimentale

Les essais ont été faites sur le un bon d'essai (Figure III-1). L'acquisition des données des tensions, courants et déphasages sont passés par un logiciel LabVIEW avec un programme spécifique pour réaliser l'opération.

Le bon d'essai dispose d'un module POWER ANALYSER (figure III-2); sert à mesurer les grandeurs électriques tel que courants, tension et déphasage et transmettre ces valeurs avec une connexion IP/TCP en temps réel selon le besoin.



*Figure III-1 : Maquette des essais et acquisitions des données*

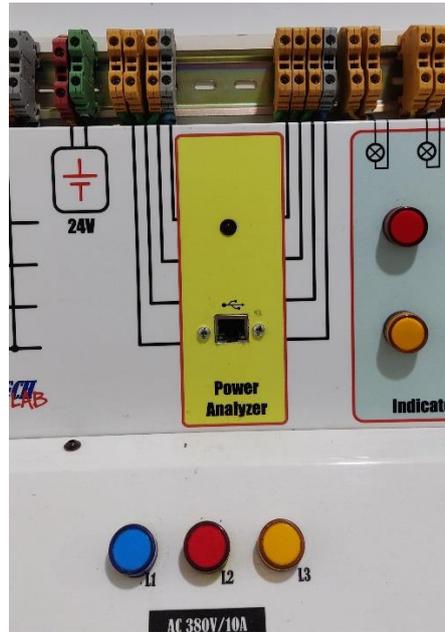


Figure III-2 : Module POWER ANALYSER.

Le logiciel LabVIEW est le cœur d'une plate-forme de conception de systèmes de mesure et de contrôle, fondée sur un environnement de développement graphique de National Instruments figure(III-3).

Un programme compatible pour l'acquisition à partir du module POWER ANALYSER est mis en disposition. Ce programme permet d'observer les données des trois variables (tension, courant et déphasage) en temps réel (Real Time) et l'exportées en fichiers texte (.txt) que nous mettrons dans l'Excel afin d'avoir une bonne analyse.

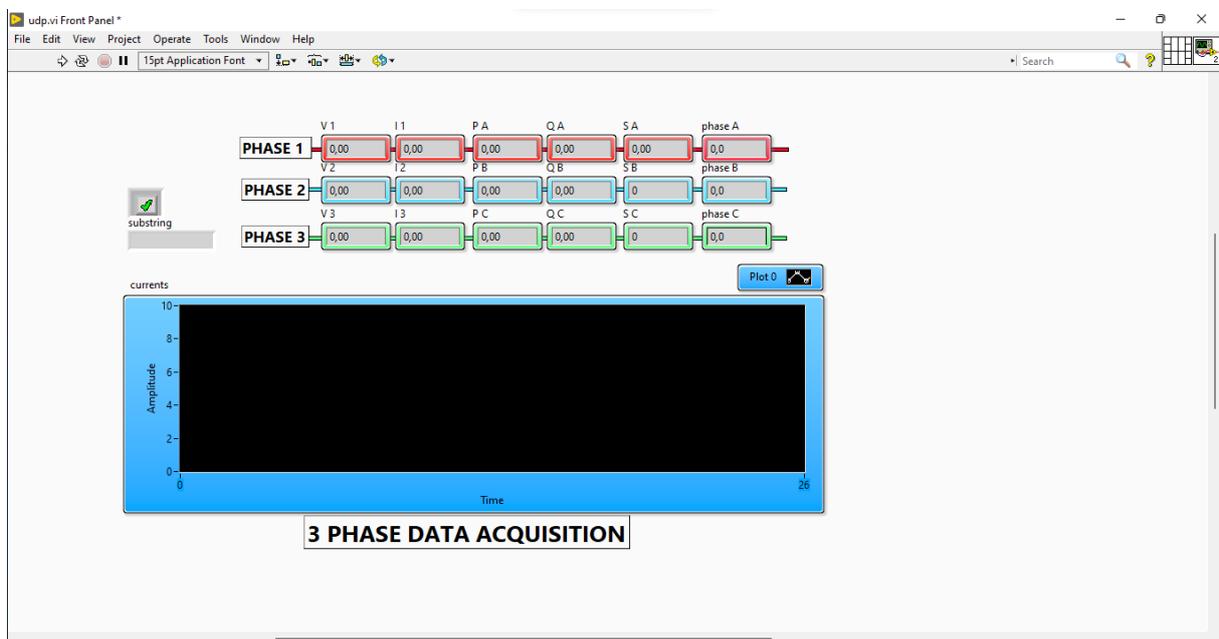


Figure III-3 : Interface du programme LabVIEW.

La machine utilisée en travaux d'expérimentation est de type asynchrone triphasée qui porte la plaque signalétique suivante :

- Constructeur : SPA Electro Industries, Algérie
- La norme de rendement énergétique international : IE 1 – 81.5% (Rendement standard)
- Indice de protection : IP55
- Classe d'isolation : F
- Tension nominale : 400 V en triangle
- Courant nominal : 6.8 A
- Puissance nominale : 3 kW
- Facteur de puissance :  $\cos\varphi = 0.84$
- Vitesse nominale : 2880 tr/min
- Fréquence d'alimentation : 50 Hz
- Poids : 20 Kg
- Type de service : S1

Afin de rapprocher au point de fonctionnement de la machine et avoir des résultats qui traduisent le fonctionnement de la machine, les essais doivent être fait à chaud (figure III-4)

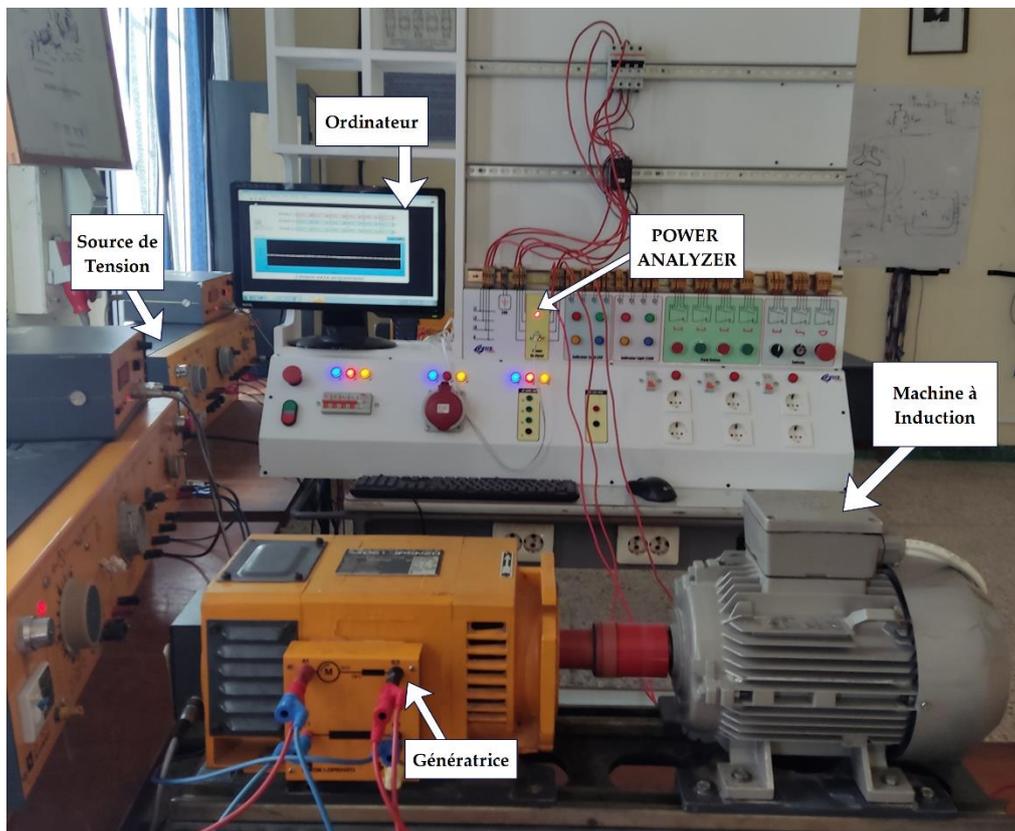


Figure III-4 : Echauffement de la MAS avec une charge (génératrice alimente une charge).

### III.3 Identification avec la méthode de la plaque signalétique

Calcul de facteur de dispersion totale de BLONDEL :

$$\sigma = \frac{1 - \cos\varphi}{1 + \cos\varphi} = 0.086957$$

Calcul du glissement nominal :

$$g = \frac{N_s - N_n}{N_s} = \frac{3000 - 2880}{3000} = 0.04 = 4\%$$

Calcul de la constante du temps rotorique :

$$\tau_r = \frac{1}{\omega_r} \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\sigma}}} = \frac{1}{g\omega_s} \sqrt{\frac{1}{\sqrt{\sigma}}} = 0.1465 \text{ s}$$

Calcul de l'inductance propre statorique :

$$l_s = \frac{V_s \sqrt{\sigma}}{I_s \omega_s} = 0.056038 \text{ Henry}$$

Calcul de la mutuelle :

$$M = l_s \frac{1 - \sigma}{\sigma} = 0.5884 \text{ Henry}$$

Calcul de l'inductance cyclique :

$$L_s = L_r' = l_s + M = 0.644 \text{ Henry}$$

Calcul de la résistance rotorique :

$$R_r' = \frac{L_r'}{\tau_r} = 4.015236 \Omega$$

Les paramètres obtenus sont classifiés dans le tableau qui suit :

$\sigma$	$g$	$\tau_r$	$l_s$	$M$	$L_s = L_r'$	$R_r'$
0.086957	4%	0.1465 s	0.056038 H	0.5884 H	0.644 H	4.015236 $\Omega$

*Tableau 4-1 : Résultats des calculs des paramètres avec la méthode de plaque signalétique*

### III.4 Essais classiques

Nous distinguons plusieurs essais expérimentaux tel qu'ils sont représentés ci-dessous :

### III.4.1 Essai en continu

Afin de déterminer la valeur de la résistance d'un enroulement statorique de la machine, on procède à faire le montage qui est présenté dans le schéma suivant (figure III-5).

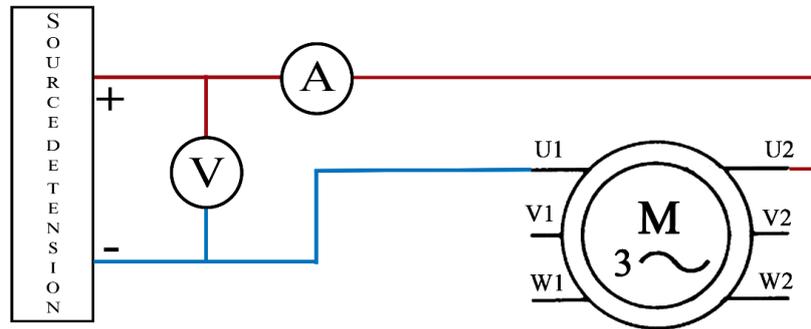


Figure III-5 : Montage du MAS en tension continue.

Le montage consiste à alimenter un enroulement avec une tension continue variable, des valeurs sont prises à chaque variation de la tension et du courant. A l'aide de la loi d'Ohm nous avons calculé la valeur moyenne de la résistance d'un enroulement de la machine qui est :

$$R_s = 8.3 \Omega$$

### III.4.2 Essai à vide

On alimente la machine à vide (sans charge) selon le schéma de la figure suivante (figure III-6).

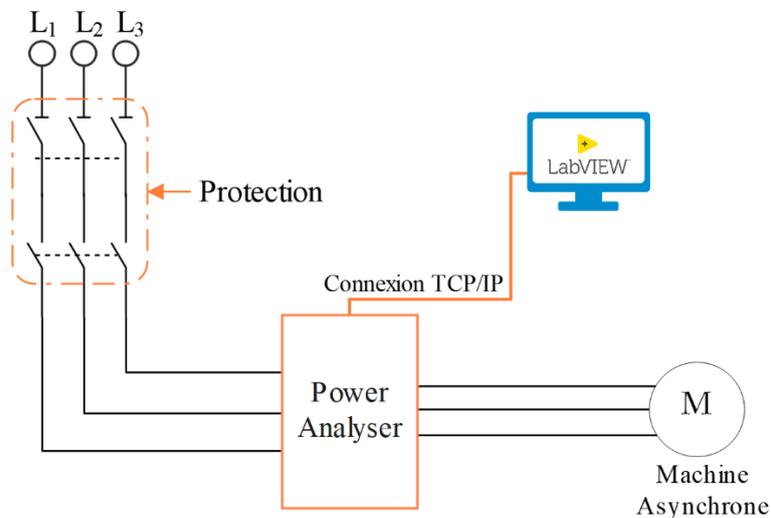


Figure III-6 : Schéma montage MAS à vide.

Dans le montage représenté dans la figure précédente une protection en disjoncteur est installée à la tête du départ vers la machine, en passant par le module POWER ANALYSER en série.

Ensuite nous lançons le programme d'acquisition LabVIEW. Le système d'acquisition répertorie 1150 valeurs, qui nous permet de déduire la puissance active, pertes joule statoriques et l'ensemble des pertes fer et pertes mécaniques.

Nous avons fait un extrait lors d'entraînement de la machine à vide avec une tension variable. Quelques données sont représentées dans le tableau suivant :

$\Phi_1$	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
81,140625	93,164062	73,6875	4,181285	3,4487	3,072809	220,27625	212,740425	214,401116
80,648437	92,53125	75,375	4,151149	3,441404	3,028344	220,178928	212,686522	214,140044
81	92,390625	74,8125	4,110787	3,437583	3,010219	219,866551	212,596622	213,858933
76,992187	90,84375	79,523437	3,460512	3,232224	2,598319	212,1885	207,71716	206,519329
77,554687	90,492187	78,679687	3,417274	3,2006	2,564515	211,692612	207,330562	205,992825
78,117187	88,453125	73,054687	2,490399	2,17004	1,921636	187,850752	183,144596	183,058222
78,75	89,789062	71,859375	2,489396	2,17381	1,92	187,828857	183,185789	183,078725
79,101562	88,59375	72,5625	2,488885	2,130926	1,928704	186,861018	181,890543	182,190951
78,328125	84,726562	68,554687	1,983151	1,617428	1,589042	162,501468	157,684537	158,826702
78,257812	85,429687	68,90625	1,984205	1,618638	1,590628	162,428546	157,642416	158,833475
78,820312	84,164062	68,0625	1,983547	1,621307	1,58787	162,484768	157,718493	158,828743
77,273437	84,234375	68,34375	1,963073	1,610014	1,576518	162,109396	157,33542	158,381192
77,976562	84,585937	68,203125	1,951797	1,604696	1,561648	161,428606	156,709089	157,62683
76,851562	85,640625	68,414062	1,96255	1,606505	1,564777	161,032545	156,29336	157,300629
77,132812	84,375	67,078125	1,889742	1,537619	1,488988	155,564233	150,939627	151,820164
76,992187	84,09375	67,007812	1,888675	1,53675	1,48984	155,503372	150,885724	151,774426
75,164062	79,523437	62,648437	1,553653	1,200539	1,272912	130,171158	125,936211	127,487519
74,8125	78,960937	62,578125	1,556718	1,203609	1,273536	130,051199	125,847796	127,387692
75,023437	79,171875	62,226562	1,560261	1,204212	1,275274	130,010749	125,846311	127,404948

*Tableau 2 : Une partie des données acquises lors d'entraînement à vide (sélectionner aléatoirement)*

Nous constatons bien la présence d'un déséquilibre entre les trois phases ce qui conduit à une différence des déphasages.

#### **d. Variation des paramètres de la machine dans le cas étudié**

En se basant sur les données d'acquisition et la loi d'Ohm, nous pouvons observer graphiquement les variations des paramètres de la machine en fonction de la tension qu'ils sont représentés dans les figures III-8 et III-9.

Ces graphes ont été conçus avec MATLAB depuis l'essai à vide avec une tension variable, en se basant sur le schéma de la figure III-7.

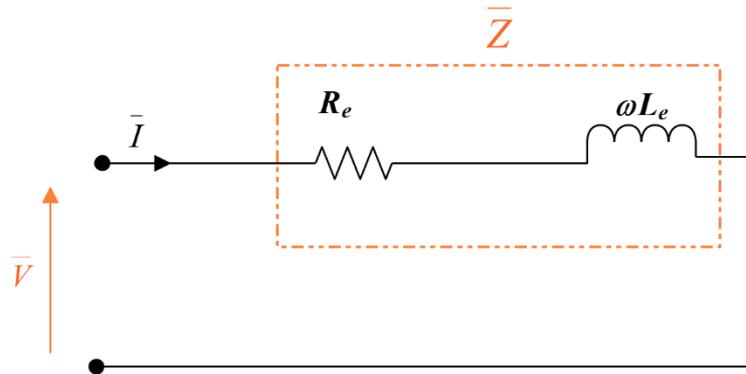


Figure III-7 : Circuit de l'impédance équivalente de la MAS.

La loi des mailles :

$$\bar{V}_{S0} = \bar{I}_{S0} * \bar{Z}; \text{ avec : } \bar{Z} = R_e + j\omega_s L_e$$

Avec :  $R_e$  la résistance équivalente de la machine et  $L_e$  l'inductance équivalente de la machine.

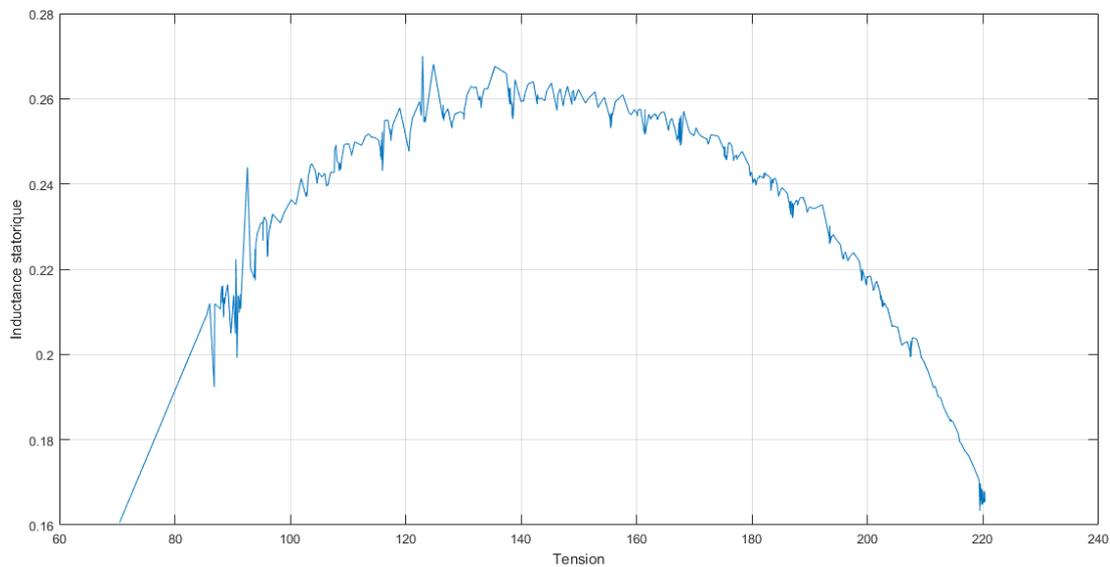


Figure III-8 : Variation de l'inductance équivalente de la machine en fonction de la tension

Cette variation présente l'influence de l'effet de saturation sur l'inductance propre statorique.

Durant la variation de la tension, le glissement de la machine se varie qui influe sur la résistance équivalente de la machine (la partie réelle de l'impédance équivalente). Ces variations sont représentées dans la figure III-9.

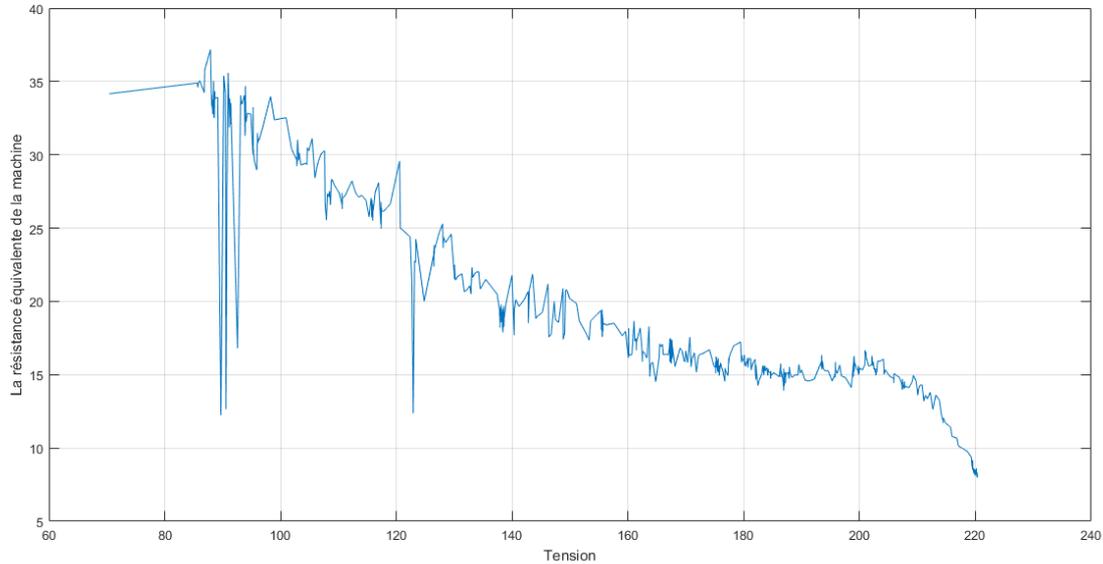


Figure III-9 : Variation de la résistance équivalente de la machine en fonction de la tension

Dans l'objectif de visualiser l'effet thermique sur la variation de la résistance, nous avons entraîné la machine en charge pour faire des essais à chaud, ensuite nous avons démarré la machine à vide pour se refroidir par sa ventilation avec une tension constante.

Les résultats de cet essai ont été enregistrés par l'acquisition, ce qui nous a permis d'illustrer ces variations dans la figure III-10.

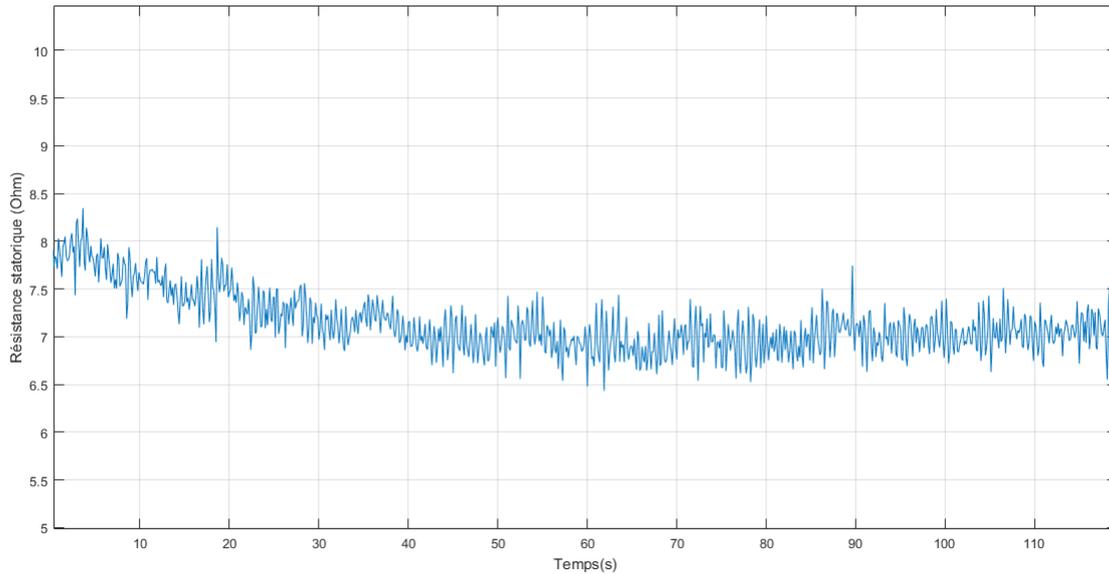


Figure III-10 : Variation de la résistance durant le refroidissement de la machine.

Nous remarquons que la résistance statorique augmente durant le fonctionnement en charge, ensuite diminue une fois la charge est débranchée. Nous concluons que ces variations sont dû à l'effet thermique.

### e. Résultats de l'essai à vide

Dans ce qui suit nous calculons l'ensemble des puissances et pertes en mettant en évidence le déséquilibre de phases, afin de se rapprocher à des résultats réels.

- La puissance absorbée à vide par la machine est de :

$$P_{a0} = 296,7679597 \text{ W}$$

- Pertes joules statoriques :

$$P_{js} = 3R_s J_s^2 \approx 106,1575267 \text{ W}$$

- Les pertes de fer statoriques et pertes mécaniques :

$$p_{fer} + P_{méc} = P_{a0} - P_{js} \approx 190,610433 \text{ W}$$

1. Détermination des pertes fer et pertes mécanique avec la méthode de séparation des puissances.

Pour cela on varie la tension d'alimentation de la machine, et on obtient la courbe  $(P_{fer} + P_{méc}) = f(V_s^2)$ .

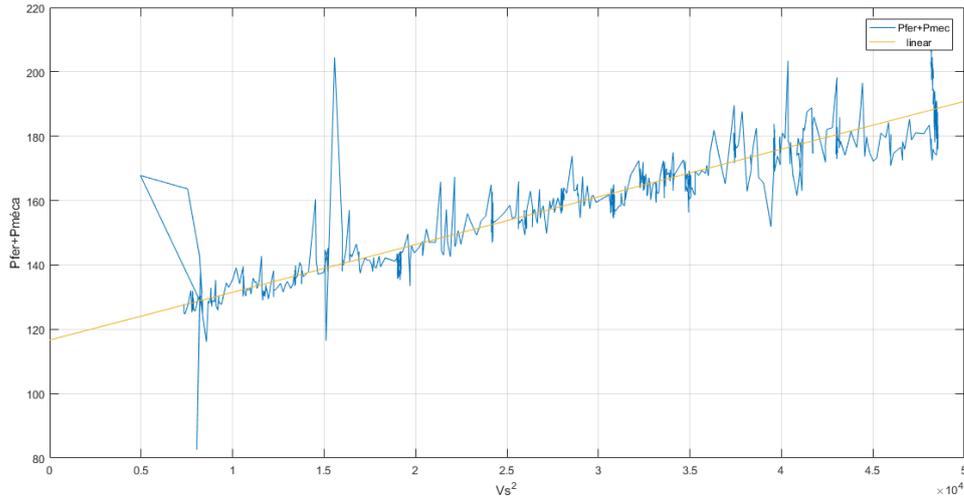


Figure III-11 : Droite des pertes mécaniques et pertes fer avec la séparation des pertes

A l'aide de logiciel MATLAB on cherche la valeur de l'intersection la droite avec l'axe des Y ( $P_{fer} + P_{méc}$ ).

Le résultat de la résolution est illustré dans la figure III-12.

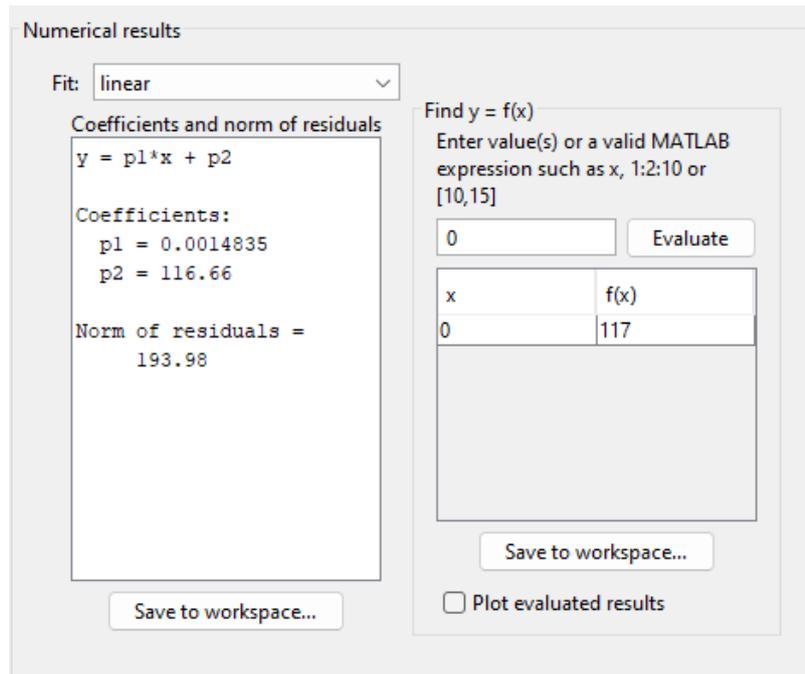


Figure III-12 : Résolution de la droite à  $(x=0)$  pour déterminer les pertes mécaniques

- Pertes mécaniques :  $p_{méc} = 116,66 \text{ W}$
- Pertes fer :  $p_{fer} = P_{a0} - p_{js} - p_{méc} = 73,9504 \text{ W}$
- La résistance de magnétisation peut être déduite d'après la relation suivante:

$$p_{fer} = \frac{3}{R_f} V_s^2 \rightarrow R_f = \frac{3}{p_{fer}} V_s^2 = 1884,577 \Omega$$

- Détermination de l'inductance à partir la puissance réactive :

$$Q_{a0} = 3UJ\sin(\varphi) = 3X_s J^2 = 2245,305395 \text{ var}$$

$$L_s = L_r' = \frac{3V_s^2}{Q_{a0}\omega_s} = 0,571493757 \text{ Henry}$$

### III.4.3 Essai à rotor bloqué

Cet essai nécessite le blocage du rotor de la machine, puis on varie la tension progressivement jusqu'à ce que le courant atteigne la valeur nominale.

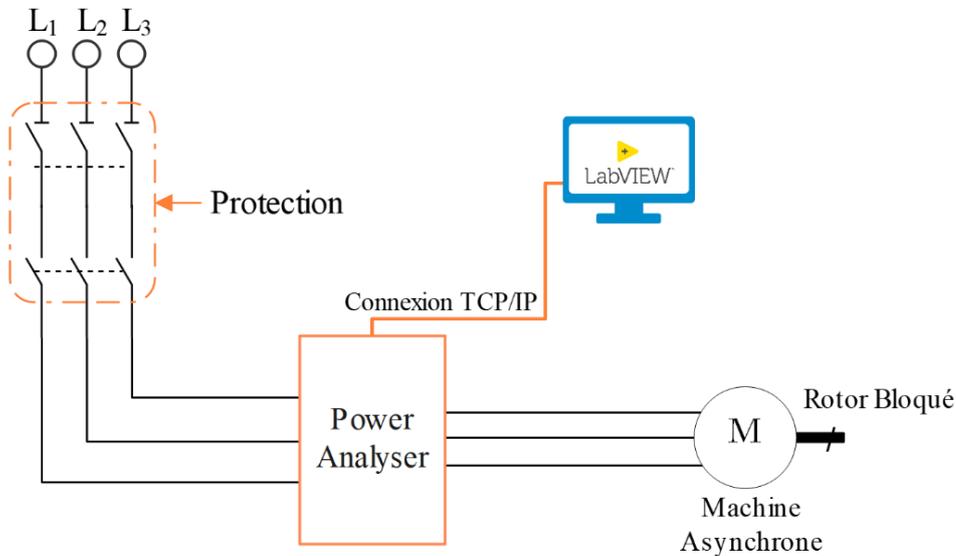


Figure III-13 : Schéma du montage de l'essai à rotor bloqué.

Quelques données de l'acquisition sont représentées dans le tableau ci-dessous :

$\varphi_1$	$\varphi_2$	$\varphi_2$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$V_1$	$V_2$	$V_3$
63,070312	62,648437	61,734375	2,398239	1,559468	2,332651	17,243629	12,03741	17,638299
63,070312	62,648437	61,734375	2,415613	1,5782	2,34149	17,354311	12,162658	17,684687
63,210937	62,71875	61,875	2,409769	1,579001	2,341431	17,356445	12,201346	17,707602
63,28125	62,789062	61,664062	2,385622	1,570382	2,330871	17,216261	12,158669	17,652957
59,414062	59,765625	59,203125	3,345284	2,56804	3,275989	22,291851	17,691923	22,743949
59,34375	59,90625	59,132812	3,34606	2,569069	3,278241	22,293428	17,698325	22,753133
59,414062	59,765625	59,273437	3,346056	2,570444	3,27927	22,275708	17,694428	22,743949
59,414062	59,765625	59,203125	3,346144	2,570794	3,280324	22,273389	17,693779	22,746917

57,65625	58,429687	57,726562	4,200645	3,356552	4,063548	26,760037	21,867865	26,945311
57,585937	58,429687	57,726562	4,201813	3,356611	4,063311	26,762913	21,870091	26,9493
57,585937	58,5	57,796875	4,200839	3,355844	4,061414	26,779056	21,881039	26,961454
56,742187	55,898437	56,601562	5,093796	4,264323	4,969876	31,690804	26,919612	31,319978
56,53125	55,757812	56,320312	5,096423	4,271598	4,992497	31,695721	26,91219	31,408858
56,601562	55,6875	56,390625	5,184957	4,393046	5,094466	32,103843	27,516162	31,898251
55,195312	54,421875	55,054687	6,510131	5,810039	6,293647	39,125689	35,085386	38,183827
55,125	54,351562	55,054687	6,510237	5,809904	6,293832	39,143316	35,091324	38,179002
54,914062	54,210937	54,984375	6,515597	5,820523	6,310473	39,125411	35,085108	38,168055
54,914062	54,210937	54,84375	6,662959	5,997131	6,459986	39,776142	35,913783	38,90516
54,914062	54,210937	54,914062	6,744699	6,087246	6,525435	40,276854	36,473965	39,321168

*Tableau 3 : Une partie des données acquises lors d'entraînement à rotor bloqué (sélectionner aléatoirement)*

Les données répertoriées à rotor bloqué, nous montre que la tension est inversement proportionnelle au déphasage, contrairement à celles du fonctionnement à vide ; la tension et le courant augmentent et le déphasage diminue.

A partir de ces données nous calculons :

a) La résistance du rotor :

La puissance active absorbée lors de court-circuit :

$$P_{acc} \cong 3(R_r' + R_s)J_{sc}^2$$

On peut donc tirer la valeur de la résistance rotorique.

$$R_r' = \frac{P_{acc}}{3J_{sc}^2} - R_s = 4,902017752\Omega$$

b) L'inductance mutuelle stator-rotor :

On a la puissance réactive absorbée en court-circuit :

$$Q_{acc} \cong 3(L_f\omega_s)J_{sc}^2$$

Sachant que  $L_f$  est l'inductance de fuite :

$$L_f = \frac{Q_{acc}}{3\omega_s J_{sc}^2} = 0,054889067 \text{ Henry}$$

Calcul de l'inductance mutuelle pour une phase :

$$L_{m1} = \frac{-L_f + \sqrt{L_f^2 + 4L_s^2}}{2} = 0,17106 \text{ Henry}$$

L'inductance mutuelle :

$$M = 0,5132 \text{ Henry}$$

### III.5 Calcul des paramètres mécaniques avec l'essai de ralentissement

#### III.5.1 Calcul du moment d'inertie

Le moment d'inertie est nécessaire au calcul des phénomènes dynamiques, par exemple :

- Comportement au démarrage.
- Fluctuations du couple.
- À-coups de couple d'une machine ou d'un groupe de machines.

Le moment d'inertie est calculé à partir de la différenciation de la vitesse et des pertes rapportées.

Pour se faire, nous extrairons les données de la vitesse en fonction de temps lors du ralentissement de la machine que nous représentant dans la figure III-12.

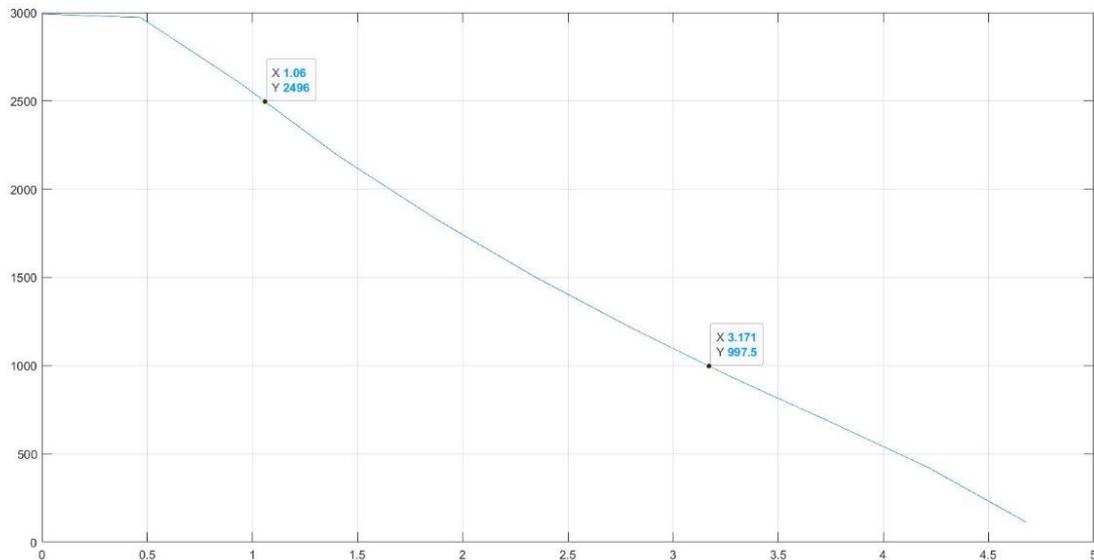


Figure III-14 : Courbe de ralentissement.

Les pertes de décélération sont calculées séparément pour les vitesses à prendre en considération ; généralement à la vitesse à vide  $n_0$ . Le moment d'inertie est calculé d'après la relation suivante :

$$J = \frac{P_{méc} 60 \Delta t}{4n_0 \pi \Delta n}$$

Alors le moment d'inertie de notre machine est de :

$$J = 0,00026226072 \text{ Kg. m}^2$$

### III.5.2 Coefficient de frottement

L'expression de la puissance dissipée par les frottements mécaniques en fonction de la vitesse est :

$$f = \frac{J}{\Delta t}$$

Et on calcule  $f$  à partir de l'expression précédente et on trouve :

$$f = 0,00006556518 \text{ N.s/rad}$$

### III.6 Résultats des essais

Les essais menés ont donné des résultats des paramètres de la machine étudiée, tel qu'ils sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Paramètres électriques		Paramètres mécaniques	
$R_s$	8,3 $\Omega$	$f$	0,000062221466 $Nm.s/rad$
$L_s$	0,571493757H	$J$	0,000279997 $Kg.m^2$
$M$	0,5132 H		
$R_r'$	4,902017752 $\Omega$		
$L_r'$	0,571493757H		
$R_f$	1884,577 $\Omega$		

En comparant ces quelques paramètres à ceux obtenus par la méthode de la plaque signalétique, nous remarquons que les résultats se rapprochent.

Nous constatons que la méthode de la plaque signalétique qui ne repose pas sur l'expérimentation, présente une estimation grossière des paramètres de la machine.

### **III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons effectué des essais pour identifier les paramètres d'une machine asynchrone en appliquant la méthode de la plaque signalétique et la méthode des essais classiques. Ces essais nous ont conduit à utiliser la méthode de séparation de pertes pour déterminer les paramètres mécaniques.

Tous ces paramètres ont été calculés après avoir réalisés des essais pratiques sur la machine asynchrone ; à tension continue, à vide et en court-circuit (rotor bloqué).

Grâce au système d'acquisition, nous avons obtenue des résultats plus précis, et aussi la possibilité de visualiser les variations des paramètres de la machine.

En se basant sur ces résultats et données, nous allons concevoir un programme sous MATLAB pour estimer les paramètres électriques de la machine par la méthode d'optimisation par essaim de particules. Cette optimisation fera l'objet du quatrième chapitre.

# CHAPITRE IV

Application de la méthode PSO à l'estimation des  
paramètres

# Chapitre IV

## Application de la méthode PSO à l'estimation des paramètres

### IV.1 Analyse et formulation du programme (introduction)

Dans cette méthode on réalise un système modèle basé sur le schéma équivalent de la machine dont on peut faire varier à volonté les paramètres sur un intervalle sélectionné. On cherche, par une méthode itérative, à minimiser la distance entre la sortie du modèle et la sortie de l'acquisition. Le problème se ramène donc à un problème de minimisation de la fonction de coût (F). Le système d'acquisition et le modèle mathématique du système sont excités par les mêmes entrées  $u(t)$  (tension).

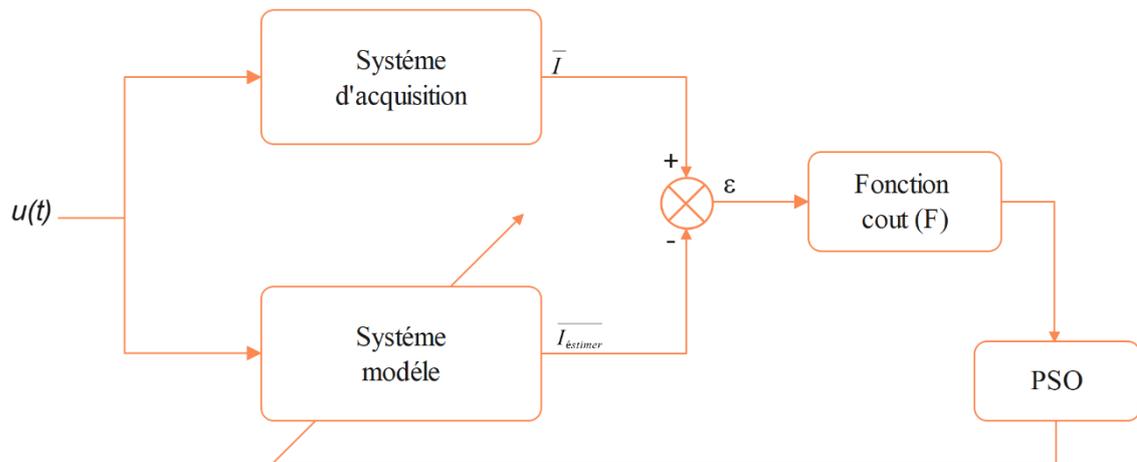


Figure IV-1 : système d'estimation des paramètres du MAS avec PSO.

#### IV.1.1 Système modèle de la machine

Nous avons traduit le schéma précédent à un organigramme d'un programme qu'on décompose en deux parties ; un programme qui génère la fonction objective (l'erreur) et une partie contient PSO.

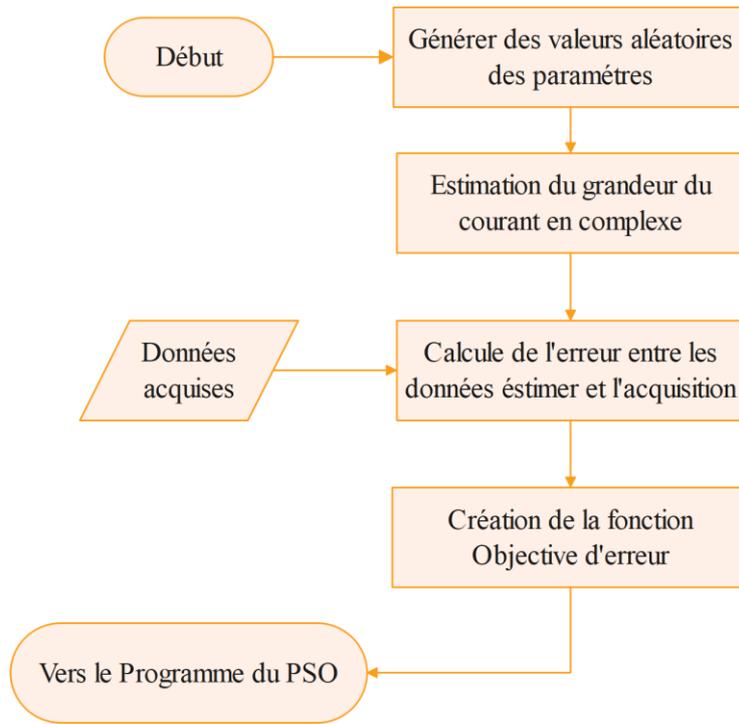


Figure IV-2 : Organigramme du programme d'estimation des paramètres

Afin d'aboutir un programme qui génère des valeurs du courant estimé qui sont basées sur les variations des paramètres de la machine, on fait appel aux schémas équivalents de la machine en fonctionnement à vide et à rotor bloqué que nous présentons ci-dessous :

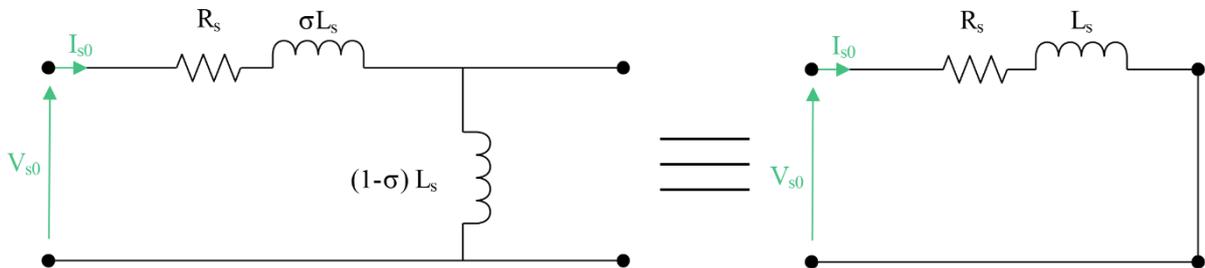


Figure IV-3 : Schéma équivalent d'une MAS à vide.

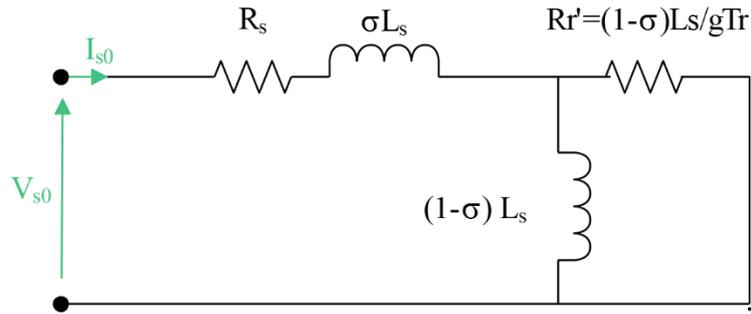


Figure IV-4 : Schéma équivalent d'une MAS à rotor bloqué

Avec :  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  est le coefficient de dispersion de Blondel.

A partir des schémas précédents on obtient les formules que le programme utilisera pour estimer le courant.

- Fonctionnement à vide :

$$\bar{V} = \bar{Z}\bar{I} \rightarrow \bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} \text{ sachant que: } \bar{Z} = R_s + jL_s\omega_s$$

- Fonctionnement à rotor bloqué :

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{\bar{Z}} \text{ avec } \bar{Z} = (Zr // Zm) + Zs \text{ et } Zs = R_s + j\sigma L_s\omega_s ; Zr = Rr ; Zm = (1-\sigma)Ls$$

#### IV.1.2 Optimisation par essaim de particules

Le programme *PSO* utilisé dans cette simulation est configuré comme l'organigramme dans la figure suivante. Il se base sur le nombre d'itérations que nous déterminons au préalable, et une fonction de coût afin de minimiser l'erreur de sortie.

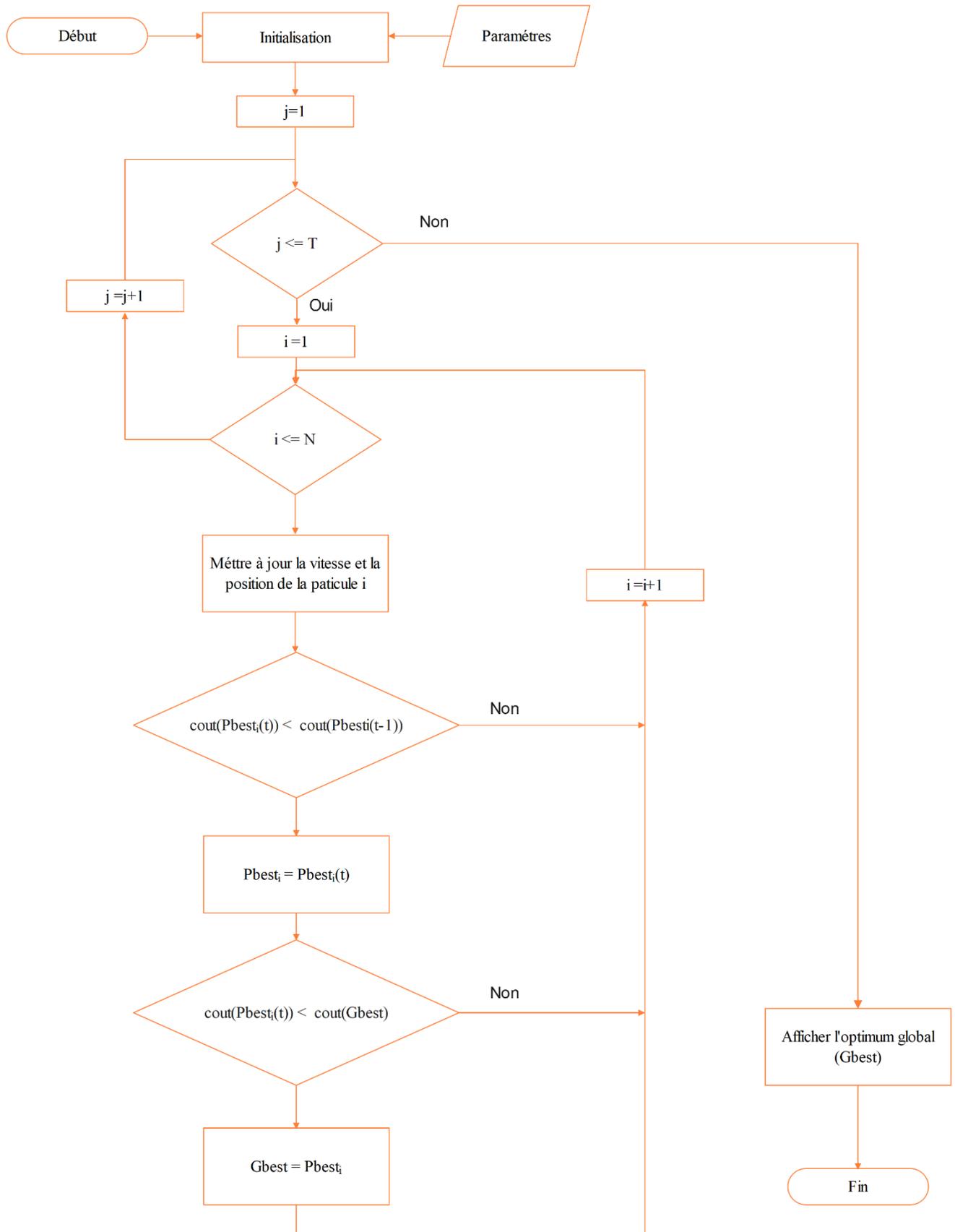


Figure IV-5 : Organigramme du programme PSO.

### IV.2 Résultats et discussion

#### IV.2.1 Résultats d'estimation des grandeurs

En visualisant la variation du courant en fonction de l'impédance équivalente des enroulements statoriques de la machine en fonctionnement à vide, nous avons obtenu la courbe représentée dans la figure IV-6.

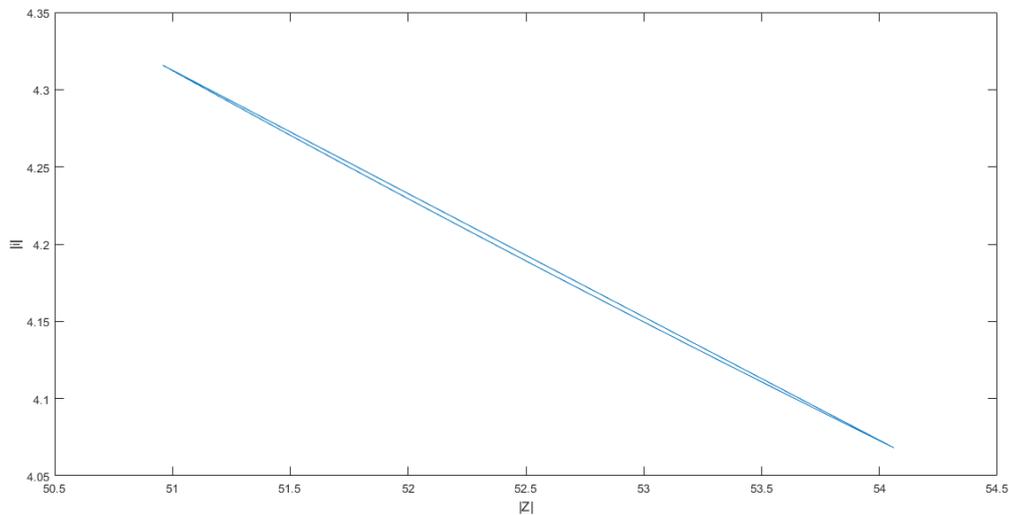


Figure IV-6 : Variation du courant estimé en fonction de l'impédance

Nous constatons bien que à chaque augmentation de la valeur de l'impédance équivalente, le courant diminue.

#### IV.3 Simulation pour l'essai à vide

Afin de déterminer la résistance et l'inductance statoriques, nous avons lancé l'exécution du programme *PSO* pour l'essai à vide, qui porte les paramètres suivants :

- Nombre de particules :  $N=50$
- Nombre d'itérations :  $T = 100$
- $C_1 = 0,9$
- $C_2 = C_3 = 2$
- Intervalle de la résistance statorique compris entre 8 et 8,5
- Intervalle de l'inductance statorique compris entre 0,1 et 0,2

L'exécution se termine en affichant les résultats illustrés dans la figure IV-7.

```
Command Window
phase =

    1

Globale best position is : =

    32507019

La valeur de l_impedance : =

    8.3844 +51.9745i

avec une erreur : =

    2.0380e-04

fx >>
```

Figure IV-7 : Résultats PSO pour l'essai à vide.

- La valeur de l'inductance statorique estimée :  
$$\omega L_s = 51.9745 \text{ alors } L_s = 0.16544 \text{ H}$$
- La valeur de la résistance statorique estimée :  
$$R_s = 8.38442 \Omega$$
- L'erreur entre les valeurs estimées et les données d'acquisition :  
$$\varepsilon = 2.038 * 10^{-4}$$
- Les variations de la position  $G_{best}$  durant l'exécution de la fonction objectif est illustré dans la figure IV-8.

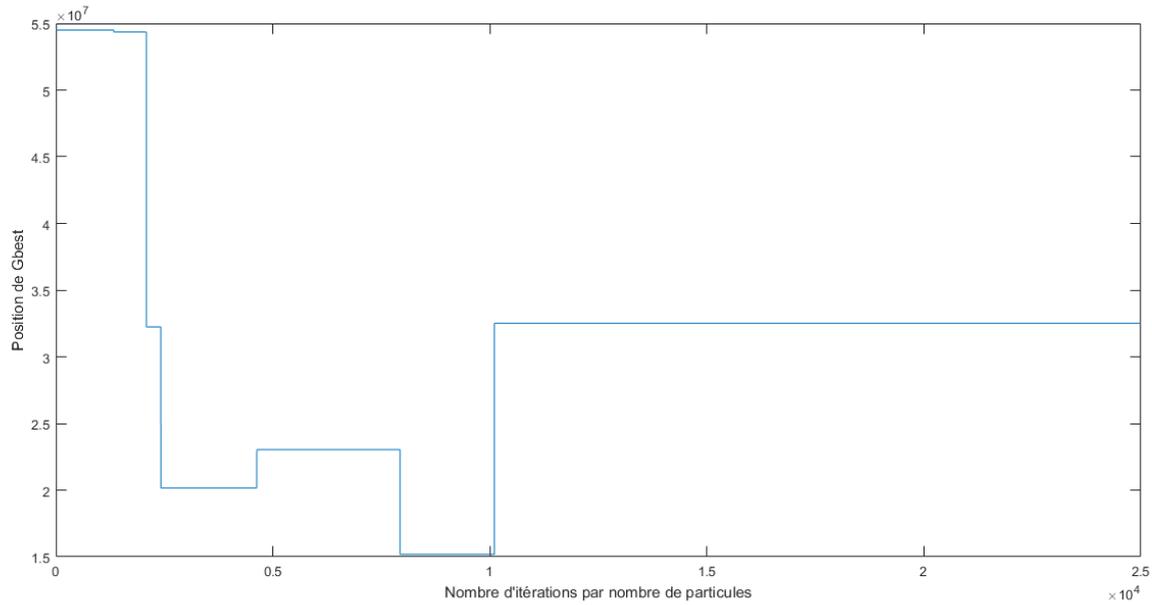


Figure IV-8 : Variation de la position de  $G_{best}$  durant les itérations.

Nous remarquons que la position de l'optimum globale ( $G_{best}$ ) varie dans un premier temps d'exécution, ensuite il prend une valeur constante. Ces variations montrent que les optimums locaux sont inférieurs à l'optimum globale, ainsi le  $G_{best}$  se réinitialise en prenant des solutions locales.

Pour mieux comprendre cela, nous avons sauvegardé les positions de  $G_{best}$  pour avoir un graphe de la fonction *coût* en fonction de  $G_{best}$ , qui est présentée dans la figure IV-9.

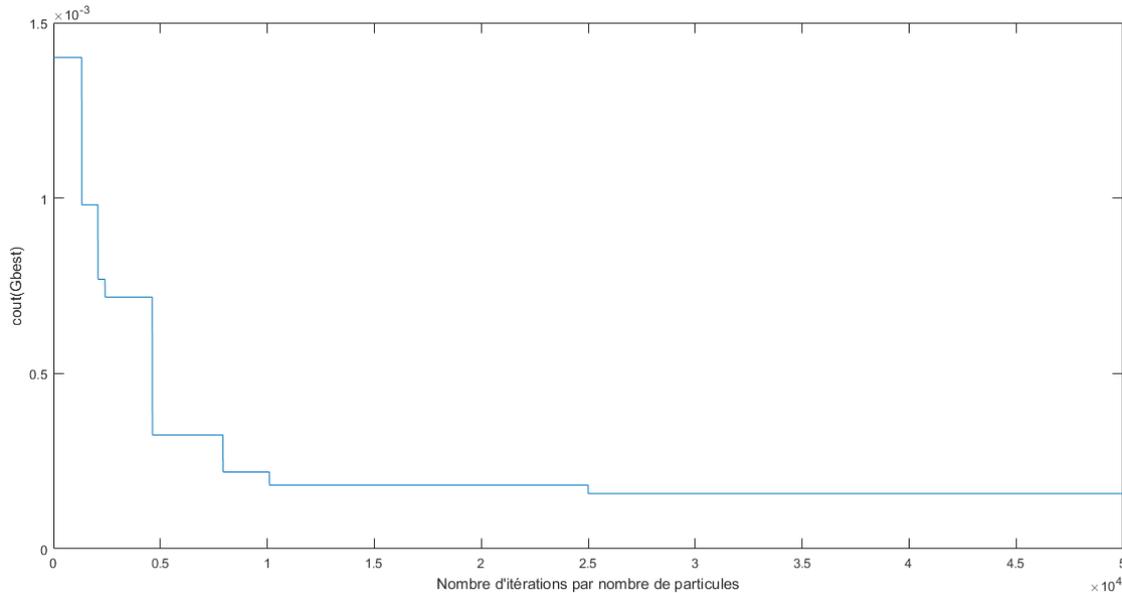


Figure IV-9: Variation de la fonction  $\text{cout}(G_{best})$  durant les itérations.

Ce graphique (figure IV-9), montre que les variations de la figure IV-8 concernant la position de  $G_{best}$  comme suit :

- **Intervalle  $[0 ; 2.5 \cdot 10^4]$**  : Tant que le programme ne satisfait pas les critères, il cherche à chaque fois une valeur inférieure à celle du présent de la fonction *coût*.
- **Intervalle  $[2.5 \cdot 10^4 \text{ jusqu'à la fin}]$**  : le programme ne trouve pas de valeur inférieure à celle du présent de la fonction *coût*, il continue l'exécution afin d'arriver au nombre d'itérations déclaré.

#### IV.4 Exécution pour l'essai à rotor bloqué

Du même pour les données acquises en essai à rotor bloqué, nous avons conçu un programme pour estimer les valeurs de la mutuelle et la résistance rotorique.

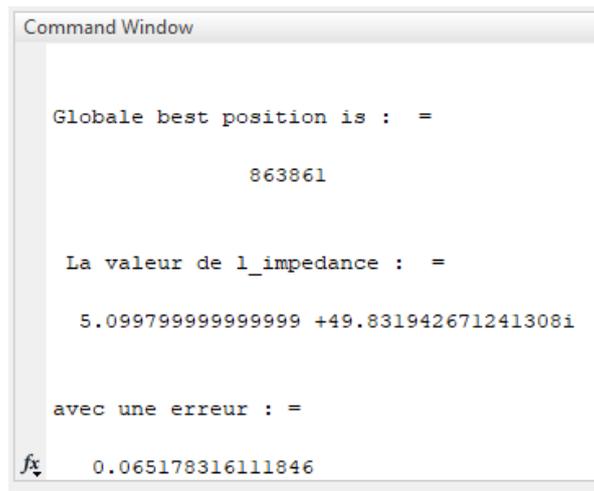
Le programme fonctionne selon le schéma équivalent de la machine asynchrone en essai à rotor bloqué, alors cela conduit à une impédance équivalente dont on connaît déjà les valeurs de l'inductance et la résistance statoriques. En supposant que l'inductance statorique égale à celle du rotor, on peut estimer les valeurs de la mutuelle, la résistance rotorique et le courant. L'objectif est de chercher l'erreur minimale entre le courant estimé et le courant réel.

Pour se faire, nous déclarons la valeur de la résistance et l'inductance statoriques, ensuite nous sélectionnons des intervalles pour les paramètres qu'on souhaite connaître à base des résultats obtenue dans le chapitre III.

Le programme *PSO* de cette exécution porte les paramètres suivants :

- Nombre d'itération :  $T=500$ .
- Nombre de particules :  $N=50$ .
- $C_1 = 0,9$
- $C_2 = C_3 = 2$
- Intervalle de la résistance rotorique compris entre 4 et 6
- Intervalle de la mutuelle compris entre 0,1 et 0,2

Les résultats de la simulation sont illustrés dans la figure IV-10 :



```
Command Window

Globale best position is : =

                        863861

La valeur de l_impedance : =

5.099799999999999 +49.831942671241308i

avec une erreur : =

fx 0.065178316111846
```

Figure IV-10 : Résultats de PSO pour l'essai à rotor bloqué.

- La Valeur de la mutuelle est de  $\omega M = 49.831942$  alors  $M = 0,15862 H$
- La résistance rotorique est de valeur :  $R_r = 5,0998 \Omega$
- On peut déduire aussi la valeur de l'inductance statorique propre avec la relation suivante :  $l_s = L_s - M = 0,00682 H$

L'erreur entre le courant estimé et le courant d'acquisition est de valeur :

$$\varepsilon = 0.0652$$

Durant l'exécution nous avons enregistré les valeurs de la position de  $G_{best}$ , que nous avons illustré dans la figure IV-11 et aussi la variation de la fonction  $coût(G_{best})$  :

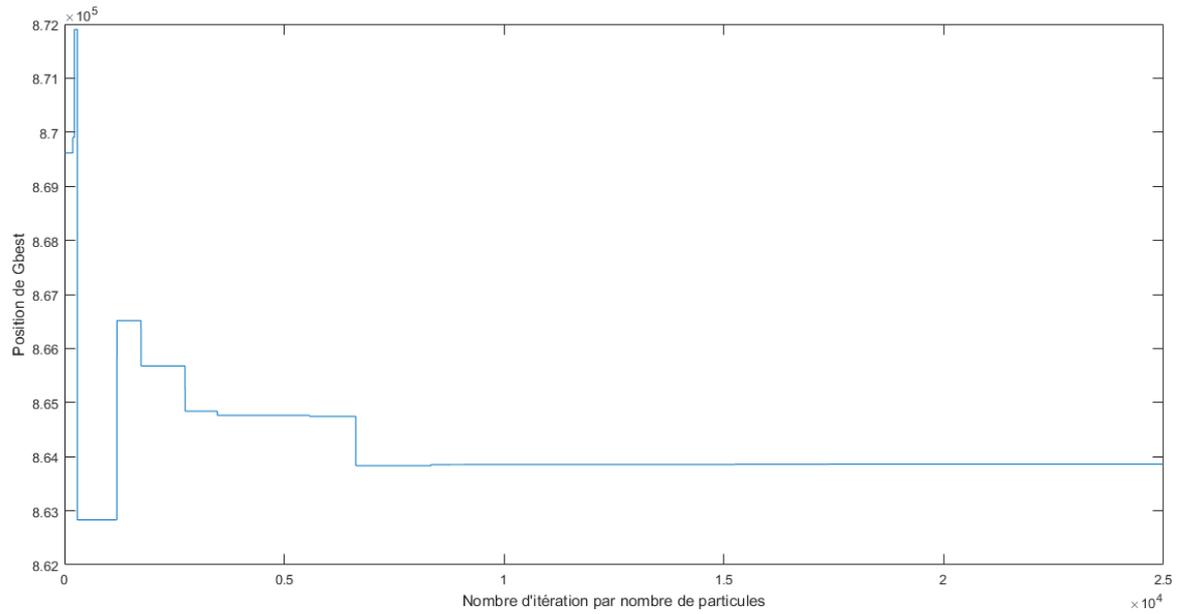


Figure IV-11 : Variation de la position de  $G_{best}$  durant les itérations.

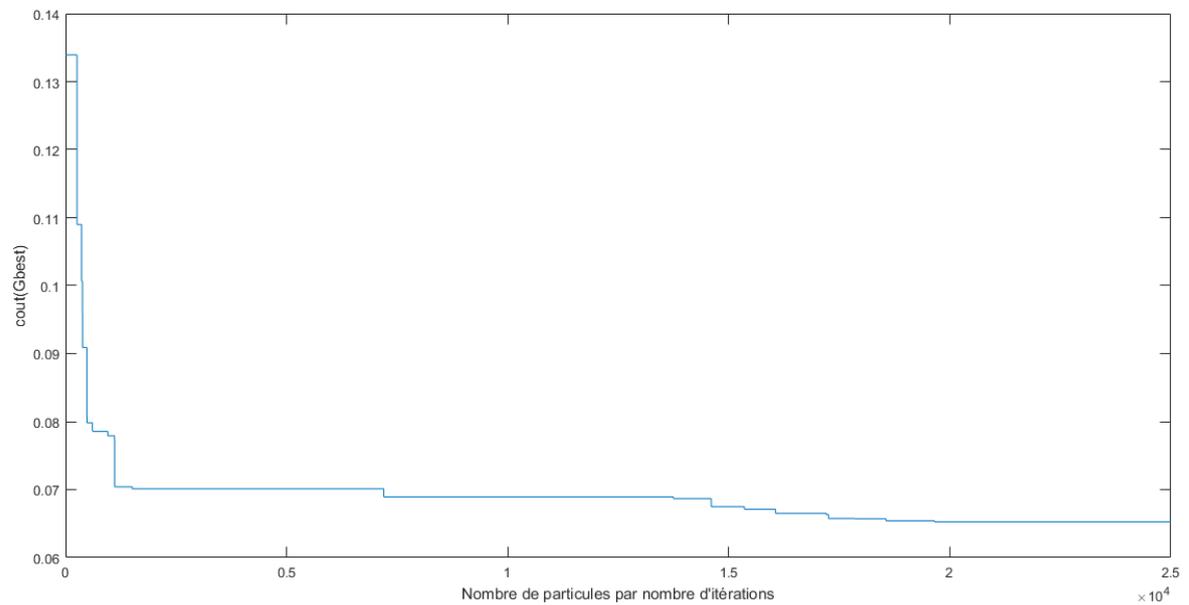


Figure IV-12 : Variation de la fonction coût( $G_{best}$ ) durant les itérations.

Durant la simulation du programme le  $G_{best}$  prend des positions aléatoires durant l'intervalle  $[0 ; 2 \times 10^4]$  ; cela est dû à l'apparitions de nouvelles positions des particules  $P_{best(i)}$  inférieurs à l'optimum globale, jusqu'à la convergence (de l'intervalle  $[2 \times 10^4$  jusqu'à la fin] à une position de  $G_{best}$  qui est proche du minimum de la fonction coût.

#### IV.5 Classification et comparaison entre les méthodes précédentes

On peut classer tous les paramètres électriques d'une seule phase obtenue auparavant dans le tableau suivant :

<b>Paramètre</b>	<b>Méthode des essais classique</b>	<b>Méthode de simulation avec PSO</b>	<b>Méthode de plaque signalétique</b>
$R_s (\Omega)$	8,3	8,38442	/
$L_s (H)$	0,1966	0,16544	0,21467
$M (H)$	0,5132	0,4759	0,19613
$L_r' (H)$	0,1966	0,16544	0,21467
$R_r' (\Omega)$	4,902017752	5,0998	4.015236
$R_f(\Omega)$	1884.577	/	/

*Tableau 4 : Résultats des paramètres par les différentes méthodes appliquées.*

Les variations de ces paramètres pour chaque méthode dépendent de la méthode de calcul utilisée et sa précision. La méthode de la plaque signalétique est utile et rapide lors de l'absence des outils expérimentaux. La méthode des essais classiques nous offre la possibilité d'identifier plus de paramètres. Cependant, il est évident que, seule une implémentation matérielle en temps réel permettrait une validation crédible et définitive de la méthode d'optimisation.

#### IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé un programme d'optimisation sous MATLAB qui servi pour estimer les paramètres électriques d'une machine asynchrone à base des données acquises des trois grandeurs (tension, courant, déphasage) en deux régimes de fonctionnement de la machine (à vide et rotor bloqué), nous avons obtenue des résultats très proches à celles obtenues par autres méthodes.

# CONCLUSION ET PERSPECTIVES

# Conclusion et perspectives

L'identification paramétrique des machines électriques, particulièrement la machine asynchrone, constitue un axe de recherche fructueux et très important en vue de leur simulation, leur commande et leur diagnostic.

Une procédure d'identification d'un système implique différents choix :

- Le type de modèle en fonction de l'objectif fixé ;
- Le critère d'optimisation et l'algorithme d'optimisation ;
- Les signaux d'excitation et les essais expérimentaux ;
- La vérification de la validité des résultats.

L'objectif de notre projet de fin d'étude est consacré à l'identification des paramètres d'une machine asynchrone triphasé à cage d'écureuil suivant quelques méthodes développées dans la littérature. Ensuite nous avons introduit une étude estimative de ces paramètres en utilisant une méthode parmi les métaheuristiques, telle que l'optimisation par essaims de particules (PSO).

Premièrement nous avons introduit un rappel sur les machines asynchrones et les méthodes d'optimisation tel qu'elles sont présentées dans le premier chapitre.

Dans le deuxième chapitre nous avons cité quelques méthodes d'identification les plus utilisées. Nous avons expliqué le principe de chaque méthode ce qui nous a conduit à mettre en œuvre les méthodes classiques pour notre partie expérimentale à vide en charge et en court-circuit.

Dans le troisième chapitre nous avons réalisé les essais classiques cités afin de déterminer les paramètres électriques et mécaniques. Tous ces paramètres ont été calculés à partir des valeurs obtenues lors des essais classiques en temps réel avec un système d'acquisition de données représentant un avantage en terme de précision.

Le quatrième chapitre représente une application de la méthode d'optimisation métaheuristique notée optimisation par essaim de particule « *PSO* ».

Après avoir présentée cette méthode, son algorithme, ses avantages et ses inconvénients, nous nous sommes intéressés par l'estimation des paramètres de la machine asynchrone par cette méthode, dont nous avons réalisé le programme final permettant de trouver les valeurs les plus proches des paramètres de la machine étudiée en se basant sur l'erreur minimal.

Au regard des résultats et des tests de validation, de la vitesse de convergence et la précision des grandeurs estimées, la technique d'identification basée sur l'optimisation PSO, mise en œuvre dans le chapitre IV, permet de déterminer les paramètres de la machine asynchrone de manière satisfaisante.

### **Perspectives pour de futurs travaux**

En ce qui concerne la poursuite de ce travail et les perspectives envisagées en guise d'activités pour de futurs travaux dans cette thématique, on propose quelques axes de recherche qui mériteraient une étude plus approfondie :

- La prise en compte du phénomène de saturation magnétique.
- Extension d'identification basée sur d'autres méthodes d'optimisation telles les méthodes métaheuristiques.
- Introduire une étude de fiabilité basé sur les variations des paramètres de la machine causées par : l'effet pelliculaire, effet de température et de la saturation.
- Concevoir un programme d'identification en ligne qui estime les paramètres en temps réel.

# Bibliographie

- 1] R. CHERGUI, *Identification des paramètres d'une machine asynchrone triphasée, Mémoire Magister en électrotechnique*, Université de EL HADJ LAKHDAR de Batna, Algerie, 2014.
- 2] M. A. A. LOUNI, *Identification des paramètres électrique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, Mémoire de Master en Electrotechnique*, Université UMMTO, Algerié, 2012.
- 3] A. TIDJANI, *Identification paramétrique d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil par la technique optimisation d'essaim de particules, Memoire de master académique en électrotechnique*, Université KASDI MERBAH de OUARGULA, 2016.
- 4] A. CHAHMI, *Identification paramétrique d'une machine asynchrone dédiée au diagnostique, Thèse de Doctorat en Electrotéchnique*, Univerité de USTHB , Algérie, 2017.
- 5] A. B. D. O. A. e. S. H. H. Sadki, «ADALINE approach for induction motor mechanical parameters,» *Mathematics and Computers in Simulation*, p. 86–97, 2012.
- 6] R. B. S. S. V.P. Sakthivel, «Artificial immune system for parameter estimation of induction motor,» *Expert Systems with Applications*, vol. 37, n° %12010, pp. 6109-6115, 2010.
- 7] W. G. M. M. A. T. Paolo Castaldi, «A new adaptive approach for on-line parameter and state estimation of induction motors,» *Control Engineering Practice*, vol. 13, pp. 81-94.
- 8] S. G. M. S. S. Bittanti, «Parameter estimation in induction motors: a comparison between the PE and the TS paradigm,» *Proceedings of the 18th World. Congress The International Federation of Automatic Control. Milano (Italy)*, pp. 10794-10799, 2011.

- 9] U. P. V. Rasmus K., «Parameter identification of induction motors using stochastic optimization algorithms,» *Applied Soft Computing*, vol. 4, n° %12004, pp. 49-64, 2004.
- 10] Y. Y. ., F. B. J. C. L. D. e. Z. L. Jing Tang, «Parameter Identification of Inverter-Fed Induction Motors: A Review,» *energies*, vol. 11, n° %12194, p. 21, 2018.
- 11] F. F. H. N. e. F. L.-L. G. Kenne, «PARAMETER ESTIMATION METHODOLOGY FOR NONLINEAR SYSTEMS: APPLICATION TO INDUCTION MOTOR,» *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 14, n° %12, pp. 240-254, 2005.
- 12] B. Piotr, «Application of Support Vector Machines to the induction motor parameters identification,» *Measurement*, vol. 51, n° %12014, pp. 377-386, 2013.
- 13] F. D. e. F. R. F. Alonge, «PARAMETER IDENTIFICATION OF INDUCTION MOTORS: LEAST SQUARES VS. GENETIC ALGORITHMS,» *Motion Control* , pp. 341-346, 1998.
- 14] J.-L. C. Cesareo Raimundez, «IDENTIFICATION OF INDUCTION MOTOR PARAMETERS USING EVOLUTIVE STRATEGIE,» *Control Applications*, pp. 197-200, 2003.
- 15] D. A. KERBOUA, *machines électriques à courant alternatif, Polycopie cours*, Ecole Supérieur en Science Appliquées de Tlemcen (ESSAT), Algerie, 2014/2015.
- 16] F. N. G. SEGUIER, *Electrotechnique Industrielle (1 ére édition)*, Paris, France: Levoisier, 1987.
- 17] L. SOMER, *Moteur asynchrone triphasé fermé à cage ou à bagues, Manuel pour l'utilisateur*, 2007.
- 18] E. Concepts, «Difference between Squirrel Cage and Slip Ring Induction Motor,» 23 Juillet 2016. [En ligne]. Available: [https://electricalbaba.com/difference-between-squirrel-cage-and-slip-ring-induction-motor/?fbclid=IwAR2oTAQooGGlj8YJ\\_YoQoxAlhoNbEdsqCudU45tBCrUhoQ9-oD0l86As85U](https://electricalbaba.com/difference-between-squirrel-cage-and-slip-ring-induction-motor/?fbclid=IwAR2oTAQooGGlj8YJ_YoQoxAlhoNbEdsqCudU45tBCrUhoQ9-oD0l86As85U). [Accès le 2 Mai 2022].

- 19] A. Chevalier, Guide du dessinateur industriel, Hachette Education; Nouvelle édition(25 juin 2003), 2004, p. 335.
- 20] A. Fouillé, Electricité à usage des ingénieurs (Tome 2), Dunod, 1969.
- 21] A. Djamel, *Cours Master 1 : "constructions des machines électriques" de l'université de Bejaïa*, 2020.
- 22] S. OUKACINE, *Identification des systèmes non linéaires : application aux cas des systèmes d'ordre non entier, Mémoire de Magistre*, Université MOULOUD MAAMERI de Tizi-Ouzou, Algérie, 2012.
- 23] T. W. G. SYBILLE, Electrotechnique, de boeck, 4ème édition, 2005, p. 1215.
- 24] S. B. e. B. BOUTERFAS, *Mémoire de Master "Détermination des paramètres d'un moteur asynchrone par différentes techniques d'identification "*, Université de Tlemcen , Algérie., 2020.
- 25] I. BOUSSAÏD, *PERFECTIONNEMENT DE MÉTAHEURISTIQUES POUR L'OPTIMISATION CONTINUE*, UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE: THÈSE DE DOCTORAT, 2013.
- 26] J. K. I.H. OSMAN, *Meta-heuristics : theory and applications*, Boston: Kluwers Academic Publishers, 31 Mars 1996, p. 700.
- 27] A. OULD-AISSA, *Application de "Particule Swarm Optimisation " pour l'identification paramétrique de la machine asynchrone, Mémoire de MAGISTRE*, Université SAAD DAHLEB DE BLIDA, Algérie, 2009.
- 28] Wikipedia. [En ligne]. Available: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Metaheuristics\\_classification\\_fr.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Metaheuristics_classification_fr.svg). [Accès le 15 Juin 2022].

- 29] M. Ahmed, *Techniques d'Intelligence Artificielle, cours de MASTER 2 Eléctrotechnique*, Université de Bejaia, Algérie, 2021.
- 30] A. MELAHI, *Polycopie Cours Master 2 : Intelligence Artificielle*, Université de Béjaia, Algérie, 2021.
- 31] A. MECHERNENE, *Cours : Technique d'intelligence artificielle, Master 2 ELT-CE*, Université de Tlemncen, 2019.
- 32] A. E. M. Bouzid, *Optimisation par la méthode des essais particuliers D'une fonction*, Trois-rivières: Université du Qébec à Trois-rivières, 2010.
- 33] M. M. MOUSSI R., *Identification d'une machine asynchrone à cage, Memoire de fin d'étude de MASTER ACADIMIQUE*, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU , Algérie, 2017.
- 34] L. RABIA, *Modélisation, Identification expérimentale et commande vectorielle d'un moteur asynchrone triphasé, Memoire Master en Génie Electrique*, Université de KASDI MERBAH Ouargla, Algérie, 2015.
- 35] M. BACHANI, *identification paramétrique de la machine asynchrone, Mémoire de magister en automatique*, Université Mohamed Boudiaf de Oran, Algérie, 2013.
- 36] C. Darwin, *On the Origin Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life.*, J. Murray, 24 Novembre 1859, p. 502.
- 37] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The MIT Press, 1992, 1975, p. 232.
- 38] I. Rechenberg, *Evolutionsstrategie : optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution.*, Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973.
- 39] A. J. O. & M. J. W. L. J. Fogel, *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*, John Wiley, New York, USA, 1966, p. 170.
- J. R. Koza, *Genetic Programming : On the Programming of Computers by Means of*

40] *Natural Selection (Complex Adaptive Systems)*, The MIT Press, 1 edition, December 1992.

A. P. É. D. T. & P. S. J. Dréo, *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*, Eyrolles (Editions), November 2003, p. 356.  
41]

M. BELHADJ, *modélisation fréquentielle de la machine asynchrone en vue de l'analyse des perturbations conduites basse fréquence*, *Thèse de doctorat en électronique en génie électrique*, Ecole doctorale des sciences et technologie de l'information des matériaux, Nantes, France, 2007.  
42]

M. C. d. d. S. Polycopie cours de l'université de ANNABA, «E-learning,» [En ligne]. Available: <https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/>. [Accès le 02 juin 2022].  
43]

B. BRADU, «Cours identification paramétrique : la méthode des moindres carées,» 2006. [En ligne]. Available: <https://docplayer.fr/50341705-Identification-parametrique-la-methode-des-moindres-carres-benjamin-bradu.html>. [Accès le 20 Mai 2022].  
44]

A. BOULAYOUNE, *Conception Assistée par Ordinateur de Machines Lentes à Inversion de Flux*, *Thèse Doctorat*, Université de Béjaia, 2017/2018.  
45]

## Abstract

The parametric identification of electrical machines, particularly the asynchronous machine, is a fruitful and very important research axis for their simulation, control and diagnosis.

In this work, a method for identifying the electrical parameters of an induction machine based on particle swarm optimization (PSO) is developed. From experimental data obtained by a real-time data acquisition system using the LabVIEW interface, electrical and mechanical parameters are identified following experimental tests carried out in no-load operation, deceleration test and locked rotor of the machine. The results obtained after simulation under MATLAB are estimated electrical parameters such as: stator resistance, stator inductance, mutual between stator and rotor, rotor resistance, rotor inductance.

### Keywords:

Induction machine parameter identifications, classical testing, data acquisition, Optimization, metaheuristics, particle swarms.

### Résumé

L'identification paramétrique des machines électriques, particulièrement la machine asynchrone, constitue un axe de recherche fructueux et très important en vue de leur simulation, leur commande et leur diagnostic.

Dans ce travail une méthode d'identification des paramètres électriques d'une machine à induction basée sur l'optimisation par essaims de particules (PSO) est développée. À partir des données expérimentales obtenues par un système d'acquisition de données en temps réel en exploitant l'interface LabVIEW, des paramètres électriques et mécaniques sont identifiés suite à des essais expérimentaux réalisés en fonctionnement à vide, essai de ralentissement et rotor bloqué de la machine. Les résultats obtenus après simulation sous MATLAB sont des paramètres électriques estimés à savoir : la résistance statorique, inductance statorique, mutuelle entre stator et rotor, la résistance rotorique , l'inductance rotorique.

### Mots-clés :

Identifications des paramètres d'une machine à induction, essais classiques, acquisition des données, Optimisation, métaheuristiques, essaims de particules.

## ملخص

يعد التحديد المعياري للآلات الكهربائية، وخاصة الآلة غير المتزامنة، محور بحث مثير ومهم للغاية لمحاكاة هذه الآلات والتحكم فيها وتشخيصها. في هذا العمل، تم تطوير طريقة لتحديد المعلمات الكهربائية لآلة الحث بناءً على تحسين سرب الجسيمات (PSO). من البيانات التجريبية التي تم الحصول عليها من خلال نظام الحصول على البيانات في الوقت الفعلي باستخدام واجهة LabVIEW، يتم تحديد المعلمات الكهربائية والميكانيكية بعد الاختبارات التجريبية التي أجريت في عملية عدم التحميل واختبار التباطؤ والدوار المقفل للآلة. النتائج التي تم الحصول عليها بعد المحاكاة تحت MATLAB هي معلمات كهربائية مفردة مثل: مقاومة الجزء الثابت، ومحاثة الجزء الثابت، والمتبادلة بين الجزء الثابت والدوار، ومقاومة الدوار، ومحاثة الجزء المتحرك.

## الكلمات الدالة:

تحديد معلمات آلة الحث، الاختبارات الكلاسيكية، الحصول على البيانات، التحسين، الخصائص الوصفية، أسراب الجسيمات