

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة البليدة 1
Université de BLIDA 1

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

Mr. BENCHAREF Hamza

&

Mr. CHEBLI Mohamed

pour l'obtention du diplôme MASTER 2 en Électronique

option automatique

Thème

Identification d'une machine asynchrone triphasée par l'application des algorithmes génétiques

Proposé par : Mr. FERDJOUNI Abdelaziz

Année Universitaire 2013-2014

ملخص:

هذا العمل عبارة عن تطبيق للخوارزمية الوراثية على مشكلة تحديد هوية الآلة المتزامنة ومقارنة أدائها مع القياسات الكهروتقنية الكلاسيكية على أساس اختبار الآلة في الفراغ ودائرة كهربائية قصيرة. النتائج التي تم الحصول عليها من الأسلوب الكلاسيكي تتعزز من خلال الخوارزمية الوراثية، في حين تم اختيار تيار البدء و الجهد كإشارات الإدخال/الإخراج، بينما تم اختيار الخطأ التربيعي بين التيار المقاس والتيار المحسوب كمعيار للتوقف، هاتان الطريقتان تسمحان لتحديد صحة المعلمات والأداء لكل أسلوب.

كلمات المفاتيح: الآلة المتزامنة، تحديد المعلمات، الخوارزمية الوراثية

Résumé :

Le présent travail consiste d'une part à mettre en œuvre un algorithme génétique sur le problème d'identification de la machine asynchrone triphasée, et d'autre part de comparer les résultats obtenus avec ceux obtenus par la méthode électrotechnique classique basée sur des essais à vide et en court circuit.

Les résultats obtenus à partir de la méthode classique sont améliorés à travers un algorithme génétique, considérant le courant de démarrage et la tension comme des signaux d'entrée/sortie, tandis que l'erreur quadratique entre le courant mesuré et le courant calculé a été choisi comme critère d'arrêt, ces deux méthodes permettant de conclure sur la validité des paramètres et la performance de chaque méthode.

Mots clés : Machine asynchrone; Identification; Algorithme génétique.

Abstract :

This work consists of implementing a genetic algorithm on the problem of identification of the three phase asynchronous machine and compares its performance with the classic Electrotechnical method based on vacuum testing and short circuit.

The obtained results from the classical method are enhanced through a genetic algorithm, whereas the starting current and voltage as input/output signals, while the squared error between the measured current and the calculated current has been chosen as a criterion for judgment, these two methods are allowed to calculate the validity of the parameters and performance of each method.

Keywords: Asynchronous machine; Identification; Genetic algorithm.

- [1] L. Mohamed, « **IDENTIFICATION DE PARAMETRES DE LA MACHINE ASYNCHRONE** », thèse de Master en électrotechnique, Université de Blida, Algérie 2012.
- [2] « **MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE A CAGE D'ECUREUIL** **MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASE A BAGUES** », Copyright © 1996 - italtec srl - Sistemi Tecnici Didattici - Milano – Italy.
- [3] O.A Ahmed, « **APPLICATION DE 'PRACTICLE SWARM OPRIMISATION' POUR L'IDENTIFICATION PARAMETRIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE** », thèse de magistère en électronique, spécialité signaux et système, Université de Blida, Algérie 2009.
- [4] HABBI Fatiha et ARFAOUYA Hafidha, « **IDENTIFICATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DU MODELE DE REFERENCE** », thèse d'ingénieur en électronique option contrpole, Université de Blida, Algérie 2010.
- [5] Y. J. Park, H. S. Cho, D.H. Cha, Genetic « **ALGORITHM-BASED OPTIMIZATION OF FUZZY LOGIC CONTROLLER USING CHARACTERISTIC PARAMETERS**», Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation, pp. 831- 836, 1995.
- [6] M. H. Shaheed, « **NEURAL AND GENETIC MODELLING, CONTROL AND REALTIME FINITE ELEMENT SIMULATION OF FLEXIBLE MANIPULATORS**», Thèse Ph.D., Department of Automatic Control and Systems Engineering, University of Sheffield, Sheffield, UK, 2000.
- [7] D.E Glodberg, « **GENETIC algorithms in search, optimization meta-heuristic** », Dans D.Corne, M.Dego, F. Glover (Eds), **New Ideas in optimization**, McGraw Hill, 1999.
- [8]

CHAPITRE 1

Description et Modélisation de la machine asynchrone à cage

CHAPITRE 2

Identification classique de la machine asynchrone

CHAPITRE 3

Les Algorithmes Génétiques

CHAPITRE 4

**Identification
paramétrique de
la machine asynchrone
par l'application de
l'algorithme génétique**

INTRODUCTION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

ANNEXES

SOMMAIRE

Remercîment

Dédicace

Résumé

Liste des figures

Liste de tableau

Listes des acronymes et abréviations

Introduction générale	1
1.1. Introduction	2
1.2. Généralités sur la machine asynchrone :	2
1.2.1 Présentation de la MAS	3
a. Le principe de fonctionnement	3
b. Construction	3
c. Constitution :	4
d. Plaque signalétique :	6
e. Plaque à bornes :	7
1.2.2 Couplage du moteur	7
1.3. Modélisation de la Machine Asynchrone.....	8
1.3.1 Modèle généralisé triphasé de la MAS	9
1.3.2 Hypothèses simplificatrices.....	9
1.3.3 Modèle triphasé de la machine	10
a. convention	10
b. Equations électriques et magnétique de la machine asynchrone.....	11
c. Equation mécanique :	12
1.3.4 Transformation de PARK.....	13
1.3.5 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK.....	14
a. Equations des tensions	14
b. Equations des flux.....	14
1.3.6 Choix du référentiel	15

a.	Référentiel lié au rotor.....	15
b.	Référentiel lié au champ tournant.....	15
c.	Référentiel lié au stator.....	16
1.3.7	Mise en équation d'état.....	16
a.	Equations électriques :.....	17
b.	Equations mécaniques :.....	17
1.4.	Conclusion.....	17
2.1	Introduction.....	18
2.2	Détermination des paramètres électriques.....	19
2.2.1	Mesure des résistances statoriques :.....	19
2.2.2	Essai à vide : Détermination de L_s et R_f	22
2.2.3	Essai à rotor bloqué : Détermination de M_{sr} et R_r :	27
2.3	Détermination des paramètres mécaniques.....	30
2.3.1	La carte dSPACE.....	30
a.	Domaines d'application :	31
b.	Avantages majeurs.....	31
c.	Constitution.....	31
d.	L'environnement MATLAB-Simulink.....	31
2.3.2	Détermination du moment d'inertie.....	32
2.3.3	Détermination du coefficient de frottement K_f :.....	36
2.4	Résultats des paramètres identifiés :	37
2.5	Conclusion.....	38
3.1	Introduction.....	39
3.2	Analogie avec le modèle biologique.....	40
3.3	Principe de fonctionnement.....	40
3.3.1	Paramètres importants d'un AG.....	41
a.	Génération de la population initiale:.....	41
b.	Taille de la population:.....	42
c.	Le codage:.....	42
•	Le codage binaire:.....	43
•	Le codage par permutation de valeur entière:.....	43
•	Le codage par valeurs:.....	43

3.3.2	L'évaluation	44
3.3.3	Les opérateurs génétiques	44
3.3.3.1	La sélection:.....	44
3.3.3.2	Opérateurs de croisement:	47
3.4	Applications	49
3.5	Conclusion.....	50
4.1	Introduction :	51
4.2	Identification des paramètres :	51
4.3	Le codage des chromosomes :.....	51
4.4	La génération de la première population :.....	52
4.5	Evaluation de la population :	52
a.	Les schémas bloc Simulink :	53
b.	L'environnement dSPACE	54
4.6	La sélection	55
4.7	Le croisement :	55
4.8	La mutation	55
4.9	Tests et résultats :.....	56
4.10	Conclusion.....	57
	Conclusion générale.....	58

Bibliographie

Annexe

Les machines électriques jouent un rôle fondamental dans les différentes branches de l'industrie. Elles sont utilisées dans les entraînements réglés et principalement comme actionneur dans la grande majorité des servomécanismes. Il est connu, pour ce qui est de la partie technologique, que la productivité et la qualité du produit fini sont en partie dépendantes de la conduite des machines électriques intervenant dans le processus.

Les machines asynchrones sont par nature des machines robustes, elles sont depuis longtemps très utilisées dans l'industrie. Certes, les principes et les méthodes d'identification des machines asynchrones sont depuis longtemps connus, mais l'industrialisation à grande échelle est due aux progrès extraordinaires, accomplis durant ces dernières décennies dans des différents domaines. Donc, facilite l'automatisation, meilleur performances, durée de vie, maintenance réduite, en bref, un coût d'exploitation plus faible.

L'objectif de ce travail est d'identifier les paramètres caractéristiques de la machine asynchrone par deux méthodes différentes, La méthode classique basée sur des essais expérimentaux et l'autre une méthode numérique c'est l'algorithme génétique basée sur un modèle de référence.

Le présent document s'articulera autour de quatre chapitres :

- Dans le premier chapitre, nous exposerons une description générale de la machine asynchrone et sa modélisation de la machine.
- Le deuxième chapitre abordera l'identification des paramètres par la méthode classique basée sur des essais expérimentaux.
- Le troisième chapitre porte une étude détaillée des algorithmes génétiques.
- Le quatrième chapitre présentera l'optimisation des paramètres par l'application de l'algorithme génétique et les résultats obtenus par la simulation sous Matlab.

Enfin, nous achevons par une conclusion générale où nous récapitulons les résultats et nous suggérons des éventuelles perspectives.

1.1. Introduction

La machine asynchrone (MAS) ou machine à induction (MI) est actuellement la machine électrique dont l'usage est le plus répandu dans l'industrie. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste et facile à construire. Elle permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable, et la place qu'elle occupe dans ce domaine ne cesse de croître.

Dans les pays industrialisés, plus de 60% de l'énergie électrique consommée est transformée en énergie mécanique par des entraînements utilisant les moteurs électriques. Le modèle mathématique de la MAS facilite largement son étude et permet sa commande dans les différents régimes de fonctionnement transitoire ou permanent. La MAS fonctionne selon le principe du champ tournant; et est, surtout pour les petites puissances, d'usage très courant et économique.

1.2. Généralités sur la machine asynchrone :

La MAS est constituée par une partie fixe, appelée stator qui est formé d'un nombre de bagues en tôles fines de silicium, empaquetées ensemble, et dans lesquels il y a des encoches où sont logés les enroulements, (un pour chaque phase), le courant d'alimentation circule dans ces enroulements

Les trois courants, déphasés entre eux de 120° électriques créent un champ magnétique dont le module est constant mais dont la direction tourne dans le temps décrivant un angle de 360° électriques pour chaque période [2].

A l'intérieur du stator est placé le rotor qui est la partie tournante. Il est constitué par un noyau cylindrique de tôles fines magnétiques à l'extérieur desquelles il y a des rainures où s'insèrent des barres de matériau conducteur comme le cuivre ou l'aluminium qui sont connectées les unes aux autres de façon à former un circuit fermé avec lequel s'enchaîne le champ magnétique.

A la mise en marche, quand le moteur est encore arrêté les spires des enroulements sont parcourues par la variation maximale du flux qui produit une f.e.m. laquelle, selon la loi de Lenz, fait circuler un courant qui fera tourner le rotor dans le même sens que celui du champ tournant.

La vitesse du rotor sera toujours inférieure à celle du synchronisme (ou du champ tournant) à cause de la variation du flux enchaîné [2].

1.2.1 Présentation de la MAS

a. Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des machines asynchrones est différent bien qu'il exploite le même champ tournant que les moteurs synchrones. Le rotor ne tourne pas en synchronisme avec le champ magnétique, il tourne moins vite, on dit qu'il est asynchrone.

Les MAS triphasées cumulent de multiples avantages : elles sont simples, robustes et faciles d'entretien. Toutes ces raisons expliquent leur popularité en milieu industriel.

Leurs applications sont nombreuses. On les retrouve, par exemple dans:

- les pompes.
- les convoyeurs.
- les élévateurs.
- les palans. Etc...

Leur puissance varie d'une fraction de kW à plusieurs centaines de kW.

b. Construction

La machine asynchrone comporte une partie fixe constituée d'une carcasse à l'intérieur de laquelle sont logés le circuit magnétique et le bobinage du **stator** d'une part, et une partie mobile appelée **rotor** d'autre part.

La carcasse nervurée à ailettes longitudinales est un monobloc en fonte ou en acier. Sur chaque moteur est fixé, côté opposé à l'accouplement, un capot en tôle d'acier ou alliage d'aluminium ou polyester thermodurcissable armé de fibres de verres, à l'intérieur duquel se trouve le ventilateur monté sur l'arbre.

Aspiré à travers le grillage du capot par le ventilateur, à ailettes droites permettant un fonctionnement correct dans les deux sens de rotation, l'air de refroidissement est pulsé le long des ailettes de la carcasse.

La figure 1.1 montre une vue en coupe d'une MAS triphasé et identifie ses principaux composants.

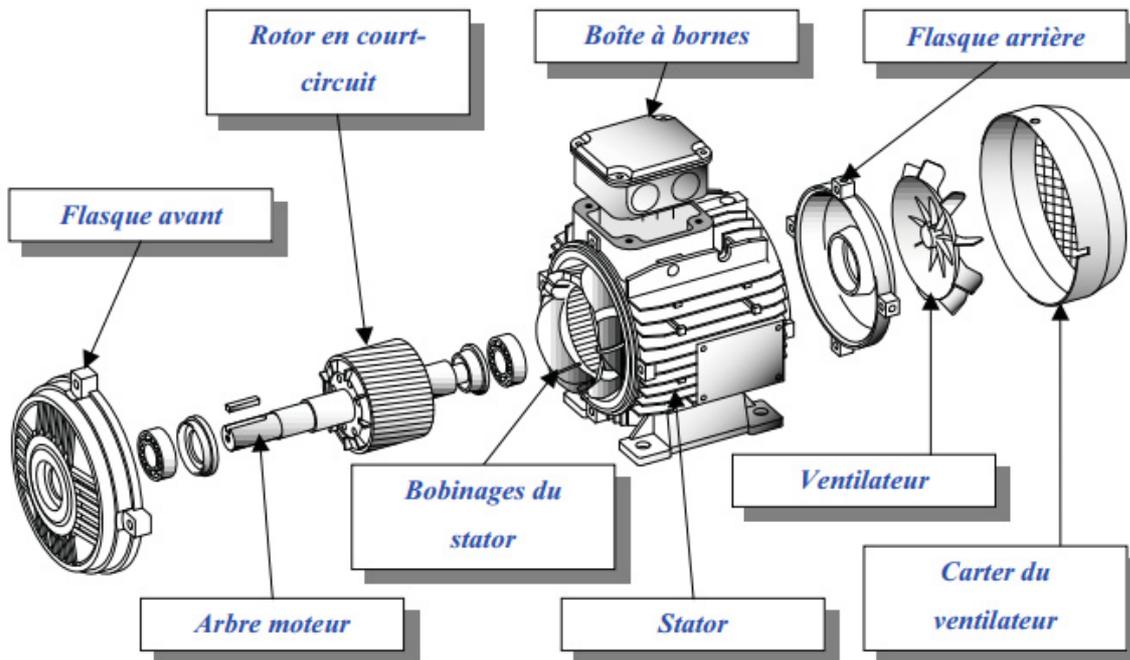


Figure 1.1 : Vue éclatée d'une MAS triphasé à rotor en court-circuit

c. Constitution :

Le stator

Le stator de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique.

Une fois cette étape d'assemblage terminée, les enroulements statoriques sont placés dans les encoches prévues à cet effet. Ces enroulements peuvent être insérés de manière imbriqués, ondulés ou encore concentriques. L'enroulement concentrique est très souvent utilisé lorsque le bobinage de la machine asynchrone est effectué mécaniquement [3].

Pour les grosses machines, les enroulements sont faits de méplats de cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches. L'isolation entre les enroulements électriques et les tôles d'acier s'effectue à l'aide de matériaux isolants qui peuvent être de différents types suivant l'utilisation de la machine asynchrone.

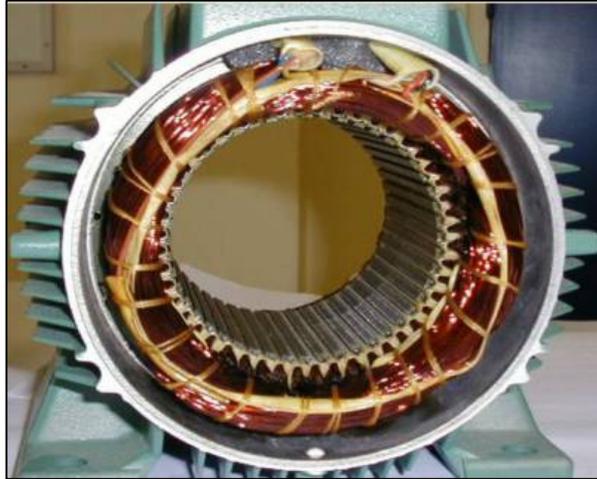


Figure 1.2 : Stator

Le rotor :

Tout comme le stator, le circuit magnétique rotorique est constitué de tôles d'acier qui sont, en général, de même origine que celles utilisées pour la construction du stator. Les rotors des machines asynchrones peuvent être de deux types : *bobinés* ou à *cage d'écureuil*.

Les rotors bobinés sont construits de la même manière que le bobinage statorique (insertion des enroulements dans les encoches rotoriques). Les phases rotoriques sont alors disponibles grâce à un système de bagues-balais positionné sur l'arbre de la machine [3].



Figure 1.3 : Rotor bobiné

En ce qui concerne les rotors à cage d'écureuil (**Figure 1.4**), les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium.

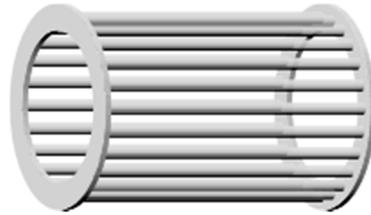


Figure 1.4 : Rotor à cage d'écureuil

d. Plaque signalétique :

Chaque machine électrique dispose d'une plaque signalétique qui consiste une sorte de carte d'identité.

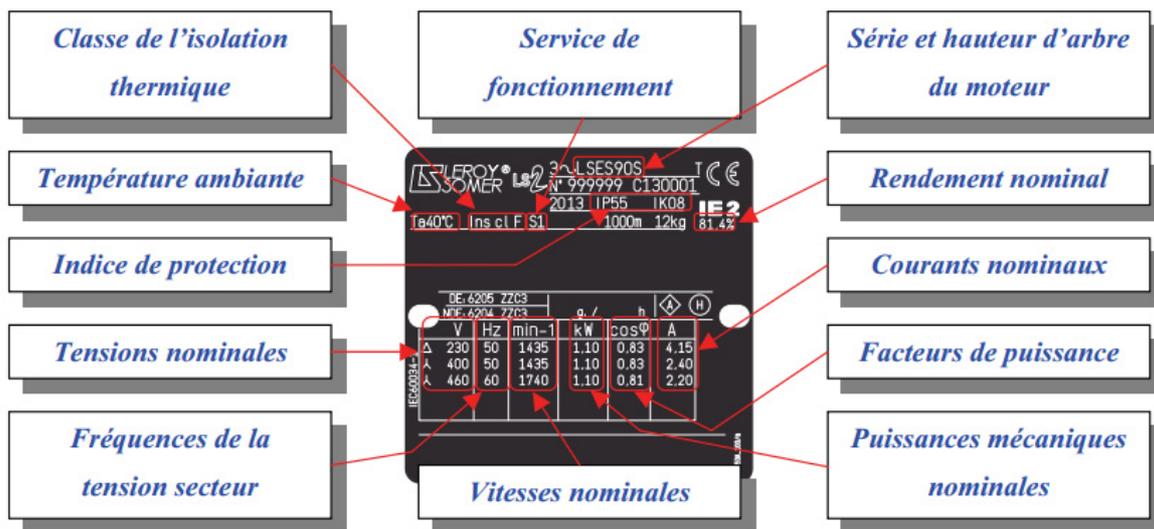


Figure 1.5 : Plaque signalétique du moteur

La classe de l'isolation thermique permet de définir la température maximale d'utilisation du moteur.

Les services de fonctionnement définissent le régime de fonctionnement du moteur (fonctionnement continue, démarrage répétés...).

e. Plaque à bornes :

La plaque à bornes sert à ramener les extrémités des bobinages du stator afin de les raccorder au réseau électrique. La position des enroulements est normalisée comme ci-dessous :

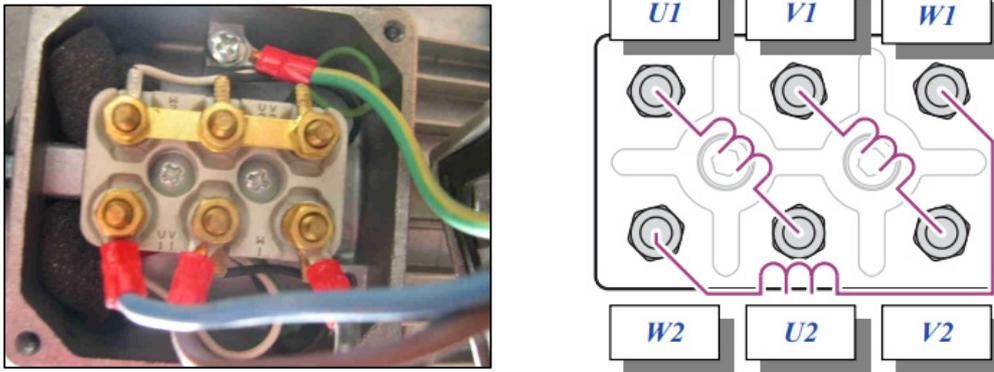


Figure 1.6 : Plaque à bornes

1.2.2 Couplage du moteur

Afin d'adapter électriquement un moteur par rapport à l'alimentation électrique distribuée sur le réseau il est impératif de coupler les enroulements du moteur.

Il existe deux couplages différents :

- Le couplage triangle
- Le couplage étoile

Il y a deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé. Le montage en étoile et le montage en triangle. Avec un branchement en étoile, la tension aux bornes de chacune des bobines est d'environ 230V. Dans le montage en triangle, chacune des bobines est alimentée avec la tension nominale du réseau (400V). On utilise le montage étoile si un moteur de 230V doit être relié sur un réseau 400V ou pour démarrer un moteur à puissance réduite dans le cas d'une charge avec une forte inertie mécanique [1].

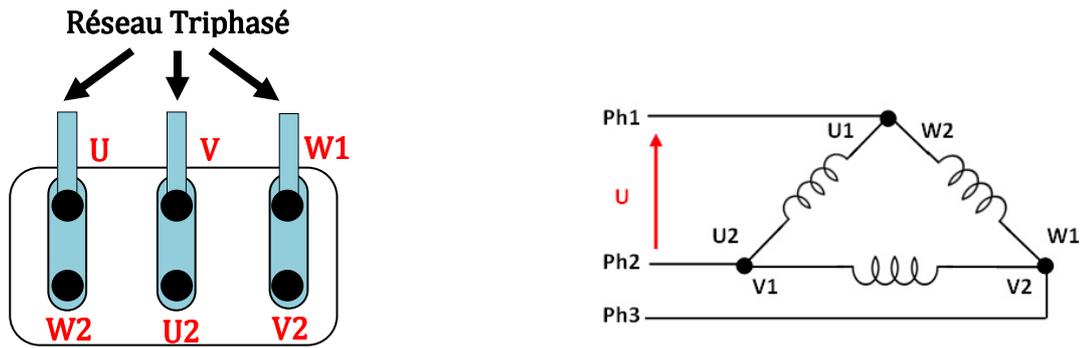


Figure 1.7 : le couplage triangle



Figure 1.8 : le couplage étoile

1.3. Modélisation de la Machine Asynchrone

La machine asynchrone n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes physiques interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation, l'effet de peau...etc. Cependant, nous n'allons pas tenir compte de ces phénomènes, car d'une part, leur formulation mathématique est difficile, d'autre part, leur incidence sur le comportement de la machine est considérée comme négligeable. Ceci nous permet d'obtenir des équations simples, qui traduisent fidèlement le fonctionnement de la machine.

La machine asynchrone est modélisée par un système de six équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions du temps. La résolution d'un tel système est difficile même avec l'utilisation de l'outil informatique.

Le modèle de Park permet d'apporter certaines simplifications. Un choix judicieux du repère de Park permet d'obtenir un modèle de la machine asynchrone.

1.3.1 Modèle généralisé triphasé de la MAS

Le modèle de la machine asynchrone triphasé est illustré par le schéma de la figure 1.9 avec les armatures statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé, sont trois enroulements du stator : A_s , B_s et C_s , et pour les trois enroulements rotoriques : A_r , B_r et C_r .

Et θ : l'angle entre l'axe de la phase statorique (A_s) et la phase rotorique (A_r).

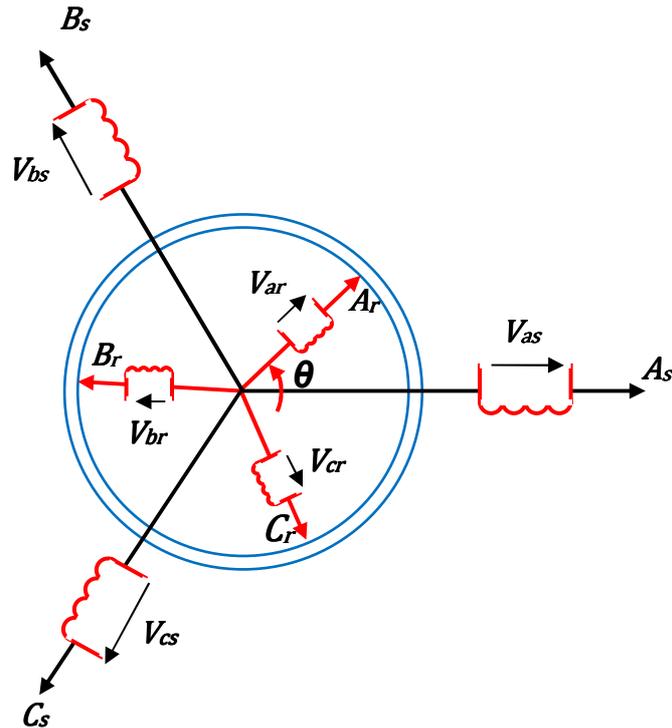


Figure 1.9: Modélisation de la machine asynchrone.

Au niveau de la méthode de modélisation mathématique, notre machine est à une paire de pôles, le passage à plusieurs paires de pôles s'effectuant de manière simple en divisant alors les angles par ce nombre de paires de pôles, on parle alors d'angle électrique. Le stator sera composé de 3 bobines identiques (A_s , B_s et C_s) régulièrement déphasées de $2\pi/3$ radians électriques, Le rotor sera considéré comme équivalent à 3 bobines identiques (a_r , b_r , c_r) court-circuitées sur elles-mêmes également régulièrement déphasées de $2\pi/3$ radians électriques [1].

1.3.2 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie propre est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, et, il est

alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices

- La machine est de constitution symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont tous négligés.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.
- L'influence de l'effet de peau n'est pas prise en compte.
- On admet de plus que la force magnétomotrice créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligé, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes rotoriques et statoriques [1].

1.3.3 Modèle triphasé de la machine

a. convention

Les trois phases statoriques A_s, B_s, C_s et mimiques a_r, b_r, c_r sont représentées dans la figure précédente.

Avec : $w = p\Omega = \frac{d\theta}{dt}$, $\theta_r = \theta_p - \theta$

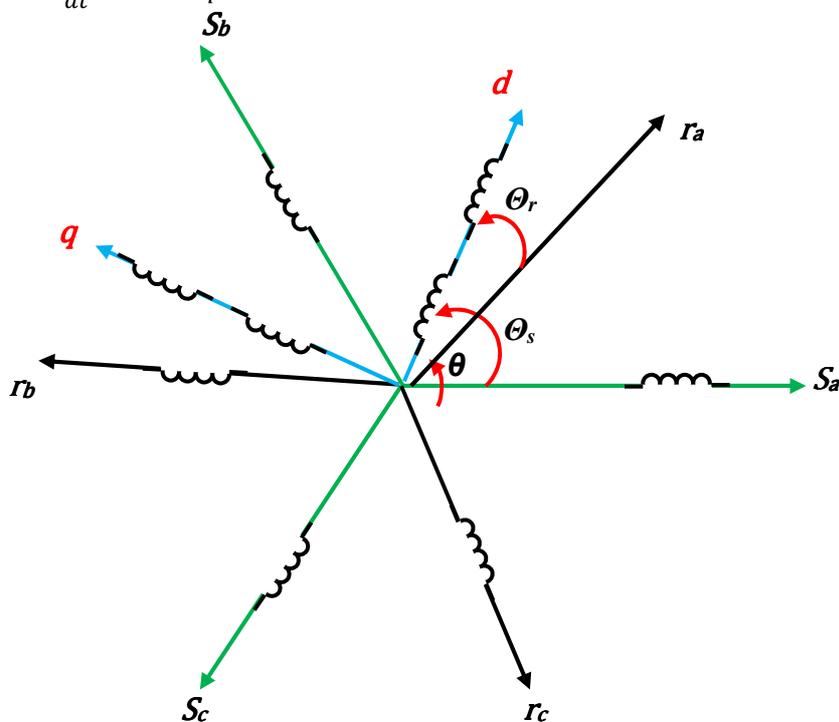


Figure 1.10 : repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

θ_p : Angle électrique stator/référentiel (d,q)

$\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt}$: Vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au stator.

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$: Vitesse angulaire des axes (d, q) par rapport au rotor.

b. Equations électriques et magnétique de la machine asynchrone

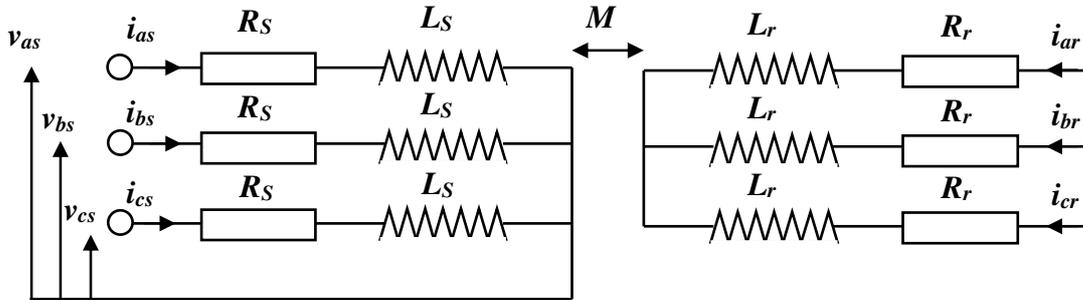


Figure 1.11 : schéma électrique de la MAS

L'application de la loi d'Ohm-Faraday à cette maille permet d'écrire les tensions statoriques et rotoriques de la machines asynchrone sont données par :

➤ Au stator :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \tag{1.1}$$

➤ Au rotor :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \tag{1.2}$$

Les flux sont données par :

➤ Au stator :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \tag{1.3}$$

➤ Au rotor :

$$[\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \tag{1.4}$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, [V_r] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix}, [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_A \\ \Phi_B \\ \Phi_C \end{bmatrix}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) est donnée par :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (1.5)$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

Tel que :

L_{ss} : Inductance propre des phases statoriques

L_{rr} : Inductance propre des phases rotoriques

M_{sr} : Inductance mutuelle entre les deux phases (stator/rotor).

En remplaçant le système d'équation (1.2) dans (1.1), on obtient le système suivant :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{ss}][I_s]) + \frac{d}{dt}([M_{sr}][I_r]) \\ [V_r] &= [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}([L_{rr}][I_r]) + \frac{d}{dt}([M_{rs}][I_s]) \end{aligned} \quad (1.6)$$

Ce sont les équations de fonctionnement de la machine asynchrone.

c. Equation mécanique :

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p[I_s]^t \frac{d}{dt} [M_{sr}][I_r] \quad (1.7)$$

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \quad (1.8)$$

Tel que :

J : Moment d'inertie de la MAS

K_f : Coefficient de frottement visqueux

C_r : Couple résistant

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation électrique de la machine).

L'application de la transformation de PARK permet la réduction d'un tel système.

1.3.4 Transformation de PARK

Afin d'aboutir à un modèle mathématique plus simple que le modèle réel du système, nous utiliserons des transformations orthogonales. Nous obtenons donc, des équations plus simples par des changements de variables appropriés. Parmi ces transformations, nous utiliserons celle de *PARK*, La figure (**Figure 1.12**) représente clairement cette transformation des axes réels « *A, B, C* » aux axes *d* et *q*.

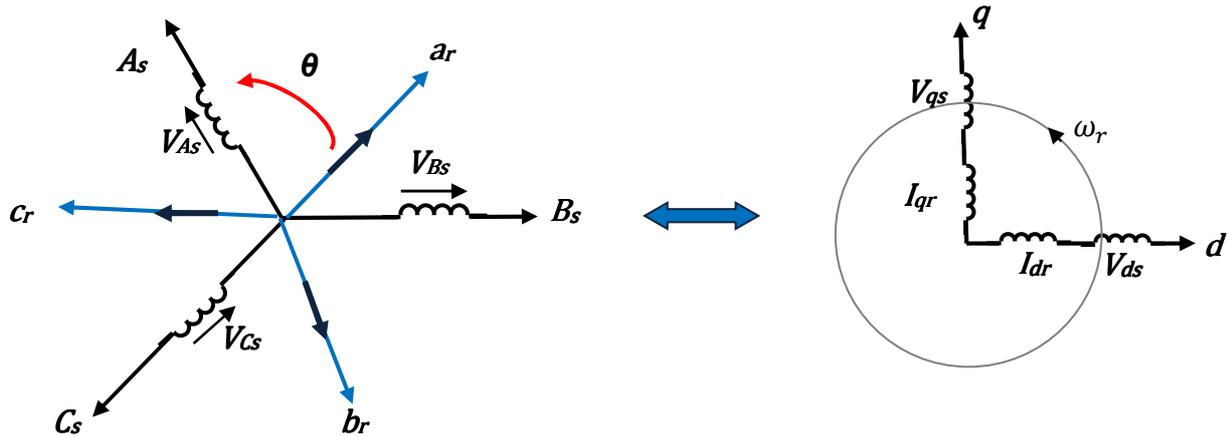


Figure 1.12 : Systèmes d'axes diphasés (*d, q*)

Cette transformation est définie par sa matrice $P(\theta)$ telle que :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

La matrice de PARK écrite sous cette forme est orthogonale, ce qui conduit à l'égalité des valeurs efficaces des grandeurs physiques dans les deux repères. De ce fait, la conservation de la puissance pour ce changement de repère est vérifiée.

L'orthogonalité nous permet d'écrire :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Remarque :

Tout au long de cette modélisation, cette transformation sera utilisée afin de conserver l'équivalence énergétique.

$$[X_d, X_q, X_0]^t = [P(\theta)][X_A, X_B, X_C]^t$$

X : Tension, courant ou flux.

1.3.5 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK**a. Equations des tensions**

En appliquant la transformation de PARK aux équations (1.1) à (1.10), nous obtenons le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_p \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_p \Phi_{ds} \end{cases} \quad (1.11)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_p - \omega) \Phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_p - \omega) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (1.12)$$

Avec :

$$\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt}$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

b. Equations des flux

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (1.13)$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases}$$

Et :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique

$M_{sr} = M_{rs} = M$: Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator

1.3.6 Choix du référentiel

Trois types de référentiels peuvent être envisagés à savoir :

- Référentiel lié au stator.
- Référentiel lié au rotor.
- > Référentiel lié au champ tournant.

a. Référentiel lié au rotor

Ce système est utilisé pour étudier les processus transitoires dans les machines synchrones et asynchrones. Le référentiel est caractérisé par :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_p}{dt} = \omega$$

b. Référentiel lié au champ tournant

La vitesse est égale à ω_s (ω_s : vitesse de synchronisme): $\omega_p = \omega_s$

$$\frac{d\theta_p}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} \Rightarrow \omega_p = \omega_s$$

Dans ce cas, il est préférable d'utiliser ce repère lors d'une étude de la commande de la machine asynchrone.

Les équations de la machine dans ce repère s'écrivent de la manière suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \Phi_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{dr} \end{array} \right. \quad (1.14)$$

Avec :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$$

c. Référentiel lié au stator

Ce référentiel est choisi en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation, associé ou non aux variations de la fréquence d'alimentation. Il est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_p}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega$$

Le modèle mathématique de la machine asynchrone avec une alimentation en tension, en fonction des variables d'état est donné par le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{di_{ds}}{dt} = -\frac{1}{\sigma L_s} \left(R_s + R_r \frac{M_{sr}^2}{L_r^2} \right) i_{ds} + \omega_s i_{qs} + \frac{M_{sr} R_r}{\sigma L_s L_r^2} \Phi_{dr} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \Phi_{qr} \omega + \frac{1}{\sigma L_s} v_{ds} \\ \frac{di_{qs}}{dt} = -\omega_s i_{ds} - \frac{1}{\sigma L_s} \left(R_s + R_r \frac{M_{sr}^2}{L_r^2} \right) i_{qs} + \frac{M_{sr}}{\sigma L_s L_r} \Phi_{dr} \omega + \frac{M_{sr} R_r}{\sigma L_s L_r^2} \Phi_{qr} + \frac{1}{\sigma L_s} v_{qs} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = \frac{M_{sr} R_r}{L_r} i_{ds} - \frac{R_r}{L_r} \Phi_{dr} - \omega \Phi_{qr} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = \frac{M_{sr} R_r}{L_r} i_{qs} + \omega \Phi_{dr} - \frac{R_r}{L_r} \Phi_{qr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p^2 M_{sr}}{j L_r} \Phi_{dr} i_{qs} - \frac{p^2 M_{sr}}{j L_r} \Phi_{qr} i_{ds} - \frac{f}{j} \omega - \frac{p}{j} \omega C_r \end{cases} \quad (1.15)$$

Où σ est le coefficient de dispersion donnée par : $\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_s L_r}$

1.3.7 Mise en équation d'état

Une machine asynchrone alimentée en tension, a comme variables de commande, les tensions statoriques V_{ds} , V_{qs} et comme perturbation le couple résistant C_r . Elle peut être décrite par plusieurs variables d'état. Notre étude sera limitée à un seul cas représenté par les courants statoriques et les flux rotoriques (i_{ds} , i_{qs} , Φ_{dr} , Φ_{qr}).

On a :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + M_{sr} \frac{di_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + M_{sr} \frac{di_{qs}}{dt} \\ V_{dr} = 0 = R_r \cdot i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} + M_{sr} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega \cdot L_r \cdot i_{qs} - \omega \cdot M_{sr} \cdot di_{qs} \\ V_{qr} = 0 = R_r \cdot i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + M_{sr} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega \cdot L_r \cdot i_{dr} - \omega M_{sr} \cdot di_{ds} \end{cases} \quad (1.16)$$

a. Equations électriques :

Nous pouvons alors écrire l'équation d'état suivante :

$$\dot{X} = AX + BU \quad (1.17)$$

$[X] = [i_{ds} \ i_{qs} \ \Phi_{dr} \ \Phi_{qs}]^T$: Vecteur d'état

$[U] = [V_{ds} \ V_{qs}]$: Vecteur de commande

$[A]$: Matrice d'évolution d'état du système dépend de Ω

$[B]$: Matrice de commande du système

b. Equations mécaniques :

L'équation mécanique de mouvement et l'équation de couple électromagnétique sont définies comme suit :

$$\begin{cases} C_{em} = P \cdot \frac{M_{sr}}{L_s} (\Phi_{ds} \cdot i_{qs} - \Phi_{qs} \cdot i_{ds}) \\ J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + \Omega \cdot f = C_e - C_r \end{cases} \quad (1.18)$$

1.4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait une description générale de la machine asynchrone à cage d'écureuil précisant ainsi sa constitution, sa structure et son principe de fonctionnement.

Ensuite, on a pu établir le modèle mathématique de la machine asynchrone, alimentée par une source de tension triphasée, en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, grâce à l'application de la transformation de Park qui ramène la machine triphasée en une machine biphasé équivalente, ce qui signifie une facilité de résolution et de simulation. Après avoir transformé les équations on a choisi le référentiel lié au stator qui est le mieux adapté pour une identification des paramètres de la machine asynchrone, où on va déterminer ces paramètres dans le prochain chapitre.

2.1 Introduction

Dans le premier chapitre nous avons étudié la représentation mathématique de la machine asynchrone à cage d'écuréuil. Dans ce qui suit, on propose une méthodologie à suivre pour identifier les paramètres d'une machine asynchrone à cage d'écuréuil. Il s'agit d'une étape préliminaire importante en vue de la réalisation de lois de commande aussi complexes que celles de la commande vectorielle. L'identification de ces paramètres électriques et mécaniques constitue donc une étape essentielle pour les travaux à venir.

Pour cela nous avons utilisé des tests à l'arrêt et en rotation.

Les résultats obtenus sont injectés dans le programme de simulation de la machine. La comparaison entre les signaux simulés et ceux mesurés permet de valider notre identification.

Comme les essais expérimentaux seront effectués en régime sinusoïdal, nous faisons appel au modèle de la figure 2.1 représentant le schéma monophasé équivalent ramené au stator. Dans ce schéma N_r et R_r représentent respectivement l'inductance de fuite totale et la résistance rotorique ramenées au stator

Le schéma équivalent de la machine asynchrone en régime permanent est donc le suivant :

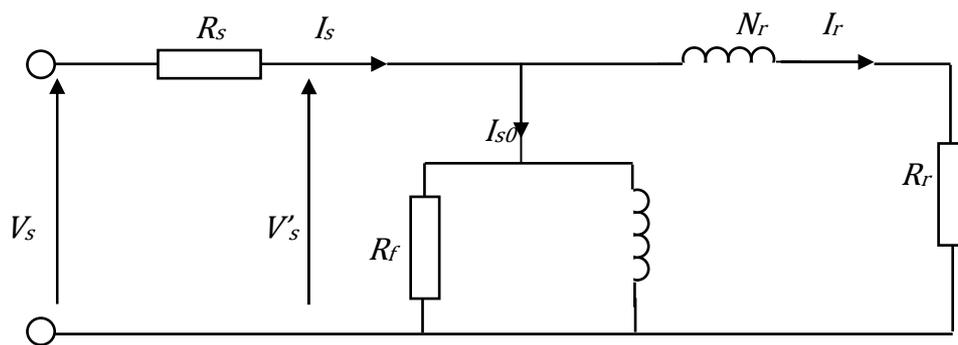


Figure 2.1 : Schéma équivalent de la machine asynchrone en régime permanent.

Matériel utilisé :

Les essais de cette méthode nécessitent un matériel spécifique avec des compétences pratiques considérables pour obtenir des résultats morbidité et aussi pour ne portent pas des risques le matériel est le suivant :

- Fils de raccordement.
- Bloc d'alimentation.
- Autotransformateur.
- Variateur de vitesse.
- Machine asynchrone à cage d'écureuil.
- Encodeur
- Ampèremètre, Analyseur, Voltmètre.
- Carte électronique **Dspace**
- Un environnement Matlab/Simulink pour la simulation.

2.2 Détermination des paramètres électriques

2.2.1 Mesure des résistances statoriques :

La mesure des résistances statoriques est faite par la méthode volt-ampérométrique, on a effectué plusieurs mesures de la tension et du courant au niveau d'un seul enroulement statorique. La résistance du stator est obtenue par le calcul de la valeur moyenne des différentes mesures.

➤ **Mesure statique sans alimentation des résistances par phase :**

La résistance du stator est obtenue par le calcul de la valeur moyenne des différentes mesures, par l'ohmmètre directement sur les phases statoriques et on a obtenu les valeurs suivantes :

Tel que :

U_1 et U_2 , V_1 et V_2 , W_1 et W_2 sont les bornes des phases.

TABLEAU DES MESURES

Les Phases	$U_1 - U_2$	$V_1 - V_2$	$W_1 - W_2$	$V_1 - V_2 + U_1 - U_2$	$V_1 - V_2 + W_1 - W_2$	$U_1 - U_2 + W_1 - W_2$	R_{moy} Ω
$R_s(\Omega)$	1.8	1.8	1.8	3.6	3.6	3.6	1.8
	1.8	1.8	1.8	3.6	3.6	3.6	
	1.8	1.8	1.8	3.6	3.6	3.6	

Tableau 2.1 : Mesure statique de R_s sans alimentation.

➤ **Mesure statique avec alimentation des résistances par phase :**

La mesure de la résistance statorique est effectuée en alimentant la machine en continue. Vu l'ordre de grandeur des résistances il convient de ne pas appliquer des tensions élevées. On utilise un voltmètre et un ampèremètre.

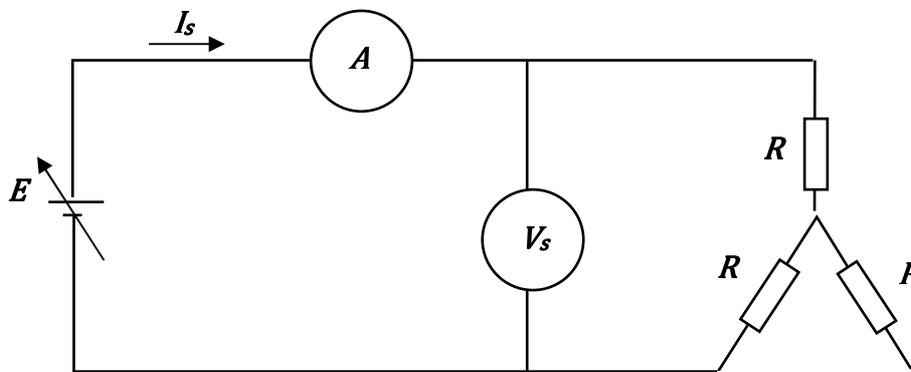


Figure 2.2 : Montage étoile neutre non accessible

La résistance du stator est obtenue par des différentes mesures de courant et tension à partir de plusieurs valeurs de tension d'entrée.

Pour la phase statorique on relève V_s et I_s

$$\text{On aura } R_s = \frac{V_s}{2I_s} \quad (2.1)$$

Et on a obtenu les mesures suivantes :

TABLEAU DES MESURES :

Tension D'entrée E(v)	Tension mesurée V_s (v)	Courant mesuré I_s (A)	$2R_s$	R_s
5	5.03	1.38	3.64	1.82
8	7.89	2.20	3.58	1.79
10	9.88	2.78	3.55	1.77
14	13.78	3.84	3.58	1.79

Tableau 2.2 : Tableau : Mesure statique de R_s avec alimentation

Alors la valeur moyenne $R_s = 1.79\Omega$

Les valeurs obtenues sont souvent entachées d'erreurs dues essentiellement à la température des enroulements, aux chutes de tension dans les connexions et les fils de liaison ainsi qu'aux instruments de mesure utilisés.

2.2.2 Essai à vide : Détermination de L_s et R_f

Dans l'essai à vide, à la vitesse de synchronisme, le modèle se réduit aux trois éléments L_s , R_s et R_f

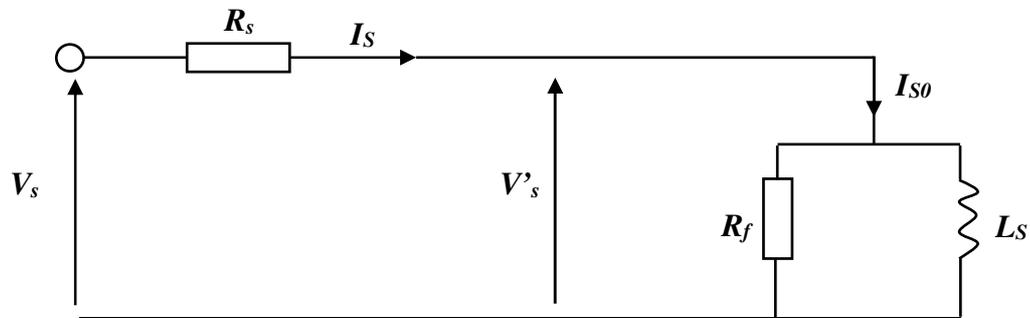


Figure 2.3 : Le modèle de la machine asynchrone à vide.

On réalise le montage de la figure 2.4, La machine est alimentée à la tension nominale, et tourne à vide, le rotor est en court-circuit, on relève donc P_{s0} , I_{s0} et V_s

On mesure la puissance absorbée par la machine par l'analyseur de réseau.

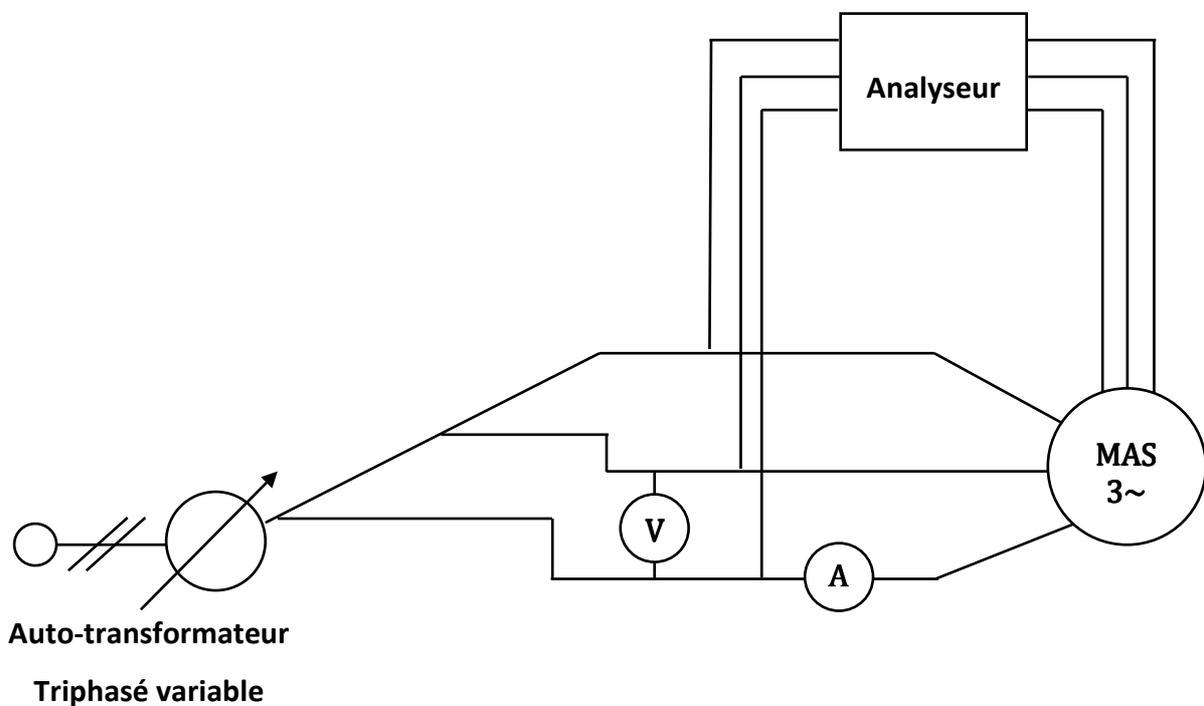


Figure 2.4 : Montage de l'essai à vide.

Pour cette mesure le fil de neutre n'est jamais utilisé.

Pour mesurer les puissances de notre machine nous avons utilisé un analyseur de marque **CHAUVIN CA 8332**, Cet équipement est destiné pour faire des mesures aux laboratoires, les Qualistar permettent d'obtenir une image instantanée des principales caractéristiques de la qualité du réseau électrique, il est maniables et précis, cet appareil propose également de nombreuses valeurs calculées et plusieurs fonctions de traitement.



Figure 2.5: Analyseur CHAUVIN CA 8332

La puissance active

La puissance active P absorbée par le moteur se calcule à partir des informations de l'analyseur, en utilisant la relation suivante :

$$P = P_1 + P_2 \quad \text{Tel que :}$$

P : La puissance active absorbée en watts [W].

P_1 : La lecture de la puissance active de la 1^{ère} phase à partir de l'analyseur.

P_2 : La lecture de la puissance active de la 2^{ème} phase à partir de l'analyseur.

La puissance réactive

La puissance réactive Q absorbée par le moteur se calcule à partir des informations de l'analyseur, en utilisant la relation suivante :

$$Q = Q_1 + Q_2$$

Q : la puissance réactive absorbée en V.A.R

Q_1 : La lecture de la puissance réactive de la 1^{ère} phase à partir de l'analyseur.

Q_2 : La lecture de la puissance réactive de la 2^{ème} phase à partir de l'analyseur.

V.A.R : volts ampères réactifs

Dans un fonctionnement à vide, la MAS absorbe une puissance P_{s0} qui correspond à la somme des pertes mécaniques, ferromagnétiques (fer) et joules au stator.

$$P_{s0} = P_{js} + P_f + P_{méca} \quad (2.2)$$

On peut déterminer la somme des pertes fer et des pertes par frottement :

$$P_f + P_{méca} = P_{s0} - P_{js}$$

TABLEAU DES MESURES :

D'après le montage 2.4 on a mesuré le courant I_{s0} et nous avons calculé les puissances actives P_{s0} et réactives Q_{s0} à partir de formules suivantes :

$$P = P_1 + P_2 \quad (2.3)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (2.4)$$

Les pertes joules statoriques s'expriment par la relation :

$$P_{js} = 3R_s I_s^2 \quad (2.5)$$

Le tableau suivant regroupe une série de mesures effectuées pour différentes valeurs de la tension composée $\sqrt{3}V_s$:

Tension $\sqrt{3}V_s$ (V)	Courant I_{s0} (A)	P_1 (W)	P_2 (w)	P_{s0} (W)	Q_{s0} (VAR)	P_{js} (W)	$P_f + P_{méca}$ (W)	$3V_s^2$
386	3.67	-282.4	401.7	119..3	1138	72,32	46.98	148996
340.3	2.57	-161.8	248.8	87	705	35.46	51.54	115804.09
320.3	2 .18	-145.8	206 .7	60.9	556.4	25.52	35.38	102592.09
300.4	2.01	-119.6	175.7	56	471.8	21.69	34.31	90240.16
250.3	1.55	-72.2	119.9	47.7	298.4	12.90	34.8	62650.09
200.3	1.20	-39.4	75.9	36.5	186.7	7.73	28.77	40120.09

Tableau 2.3 : essai à vide sous tension variable.

Pour différencier ces deux pertes et déterminer les pertes mécaniques on utilise la technique de séparation des pertes.

Il faut effectuer la mesure pour différentes tensions, Les pertes mécaniques sont approximativement constantes aussi longtemps que la vitesse de rotation ne varie pas beaucoup.

Les pertes fer varient pratiquement avec le carré de la tension appliquée aux bornes.

En traçant la courbe de la puissance $P_f + P_{méca}$ en fonction du carré de la tension d'alimentation, on obtient la caractéristique de la figure 2.5 qui est pratiquement une droite qu'on extrapole jusqu'à $U = 0$. L'ordonnée correspondante est égale aux pertes par frottement. En effet, à tension nulle, les pertes fer sont nulles.

Les pertes mécaniques, soit : $P_{méca} = 21.375 W$

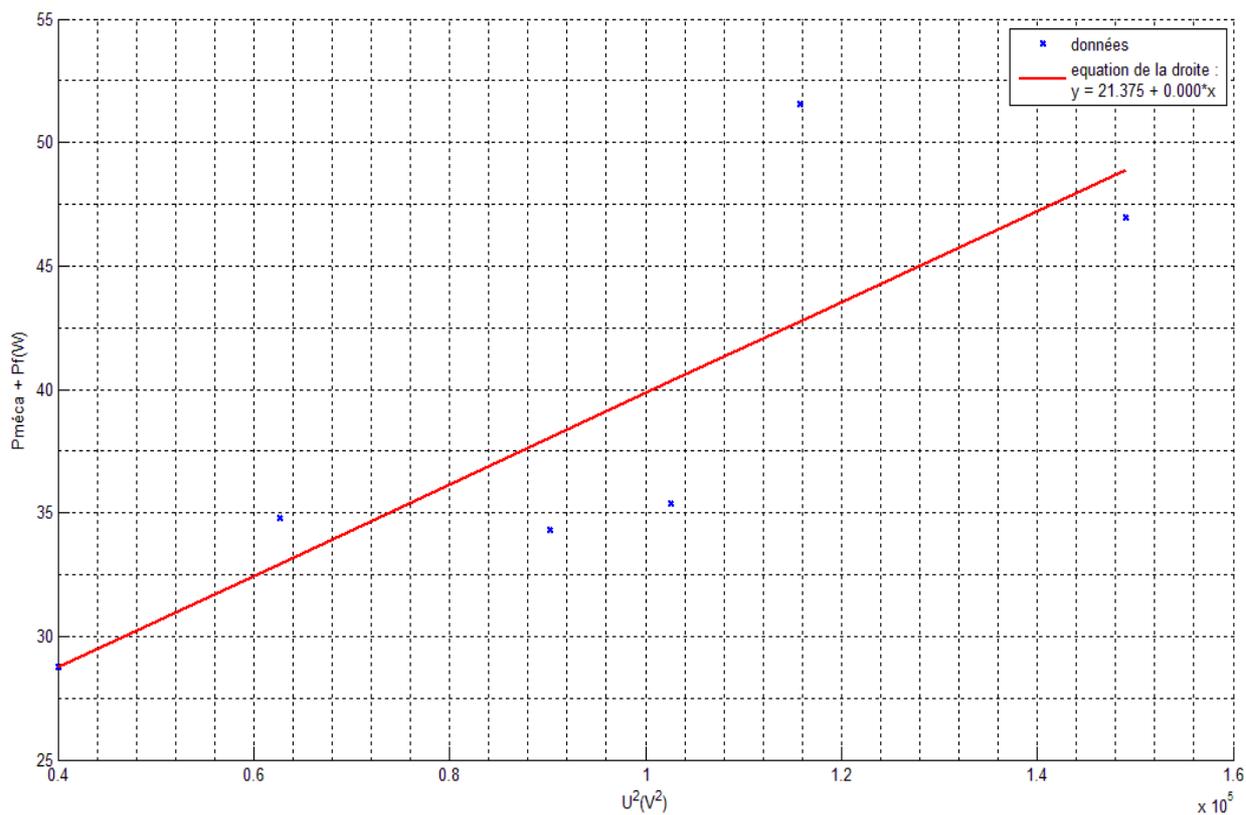


Figure 2.6: graphe des puissances.

En négligeant la chute de tension aux bornes de R_s , les pertes fer peuvent s'exprimer sous la forme :

$$P_f = \frac{3}{R_f} * V_s^2 \tag{2.6}$$

L'inductance cyclique L_s est donnée par la relation :

$$L_s = 3 \frac{V_s^2}{Q_s W_s} \tag{2.7}$$

D'après l'équation 2.2 nous avons :

$$P_f = P_{s0} - P_{js} - P_{méca}$$

Pour :

$$P_{s0} = 56W, P_{js} = 21.69 W \text{ et } P_{méca} = 21.375 W$$

$$P_f = 12.935 W$$

A partir de l'équation 2.6 on a :

$$R_f = \frac{3}{P_f} * V_s^2$$

Application numérique :

$$\text{Pour : } V_s = \frac{300.4}{\sqrt{3}} = 173.34V \quad , \quad W = 2\pi f$$

$$Q_s = 471.8 \text{ V.A.R} \quad , \quad f = 50H$$

$$I_{s0} = 2.01 \text{ A}$$

On trouve :

$$R_f = 6976.4 \Omega$$

A partir de la relation 2.7 on trouve :

$$L_s = L_r = 0.609 \text{ H}$$

2.2.3 Essai à rotor bloqué : Détermination de M_{sr} et R_r :

Le rotor de la machine asynchrone est bloqué. La vitesse de rotation étant nulle, la valeur du glissement est ($g=1$).

Le bobinage rotorique est court-circuité.

La puissance utile est nulle et les pertes par frottement en ventilation sont nulles :

$$P_{méca} = 0$$

On réalise le même montage que l'essai à vide et on bloque le rotor, montage figure 2.6, l'essai est effectué à tension réduite (**pour ne pas endommager le moteur**) permettant d'avoir le courant nominal de la machine.

On a réalisé le montage suivant :

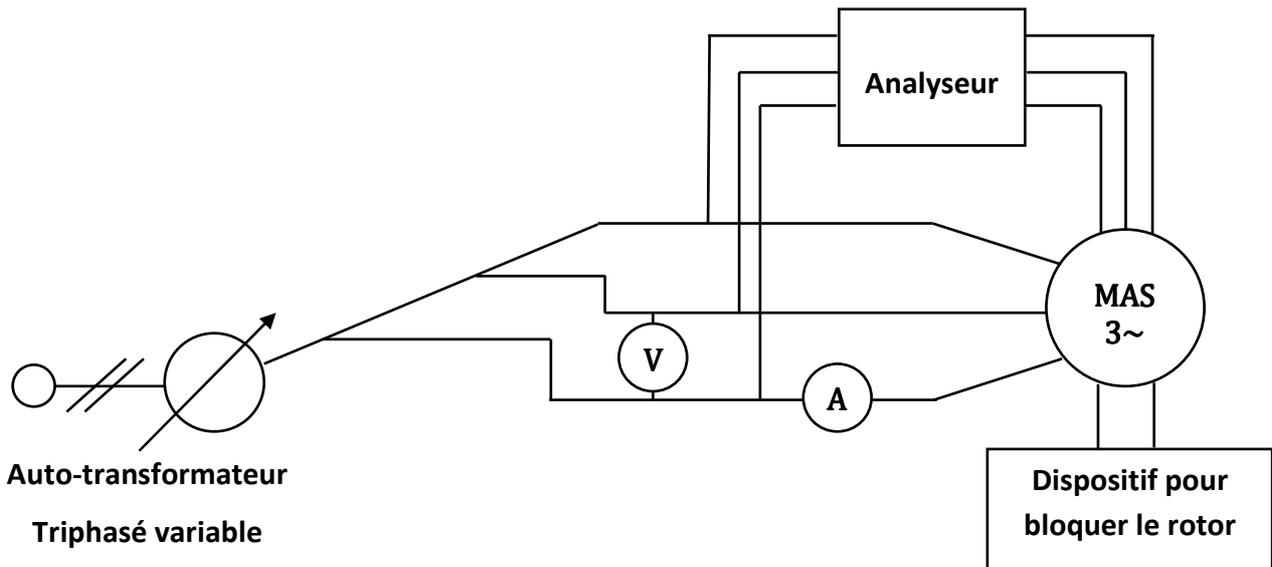


Figure 2.7 : Le montage de mesure.

Dans cet essai on utilise l'analyseur à la vitesse de synchronisme et on relève les puissances P_1 et P_2 .

La puissance active et réactive sont donnée par :

$$P = P_1 + P_2$$

$$Q = Q_1 + Q_2$$

Tableau des mesures :

Vcc (V)	Icc (A)	P1 (W)	P2 (W)	Pcc (W)	Qcc (W)
58.9	4.45	-0.8	112.6	111.9	190.9
88.4	6.6	7	246.3	253.3	428.5

Tableau 2.4 : essai à rotor bloqué

Dans ces conditions, la tension appliquée devient nettement faible devant la tension nominale, ce qui permet de négliger le courant I_{s0} et réduire le schéma de la figure 2.1 à ce qui suit :

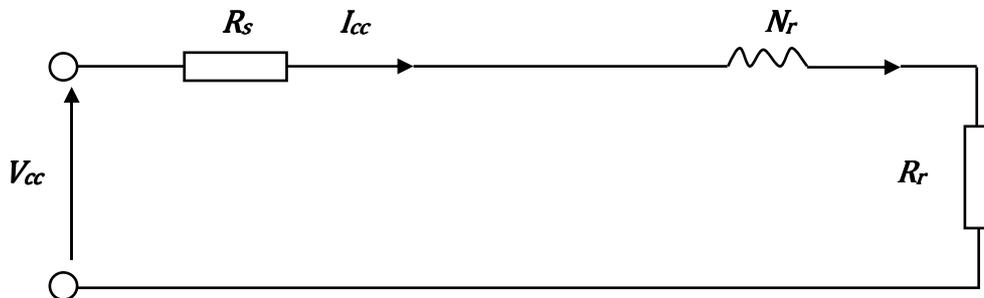


Figure 2.8 : Essai avec rotor bloqué

La figure 2.7 : permet d'écrire :

$$P_{cc} = 3(R_s + R_r)I_{cc}^2 \quad (2.8)$$

$$Q_{cc} = 3(N_r * W_s)I_{cc}^2 \quad (2.9)$$

D'après la relation (2.8) en déduit :

$$R_r = \left(\frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} \right) - R_s \quad (2.10)$$

De même façon, le calcul de N_r découle de la relation 2.9 :

$$N_r = Q_{cc}/3W_sI_{cc}^2 \quad (2.11)$$

Une fois que l'inductance de fuite N_r déterminée, le calcul de l'inductance mutuelle M découle de l'application de la relation 2.12

$$N_r = \frac{L_s L_r}{M} - M \quad (2.12)$$

Ce qui conduit à :

$$M_{Sr} = \frac{-N_r + \sqrt{N_r^2 + 4L_s^2}}{2} \quad (2.13)$$

Application numérique : avec les valeurs suivantes :

$$P_{cc} = 253.3 \text{ W} \quad I_{cc} = 6.6 \text{ A} \quad Q_{cc} = 428.5 \text{ VAR}$$

On aura donc :

$$R_r = 0.15 \Omega$$

$$M_{sr} = 0.603 \text{ H}$$

2.3 Détermination des paramètres mécaniques

2.3.1 La carte dSPACE

Les mesures de simultanées du courant de démarrage et de la tension de phase correspondante sont effectuées à l'aide de la carte dSPACE DS1104, dont le processeur principal est un MPC8240, avec un cœur PowerPC 603e, avec horloge interne à 250 MHz. Il a une capacité mémoire de 8 Mo en Flash et de 32 Mo en SDRAM.

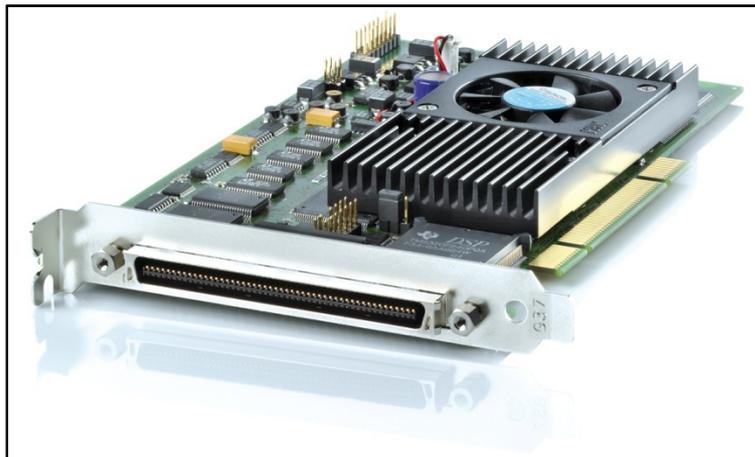


Figure 2.9 : La carte dSPACE

Le module de dSPACE dispose de 8 convertisseurs analogiques numériques (4 en 16 bits, 4 en 12 bits), de 8 convertisseurs numériques analogiques (CNA) de 16 bits pouvant délivrer une tension +/-10V, d'une liaison série, de 2 codeurs incrémentaux, de 20 entrées sorties numériques, d'un DSP esclave (TMS320F240) et de 3 timers (32 bits) peuvent fonctionner de manière indépendante.

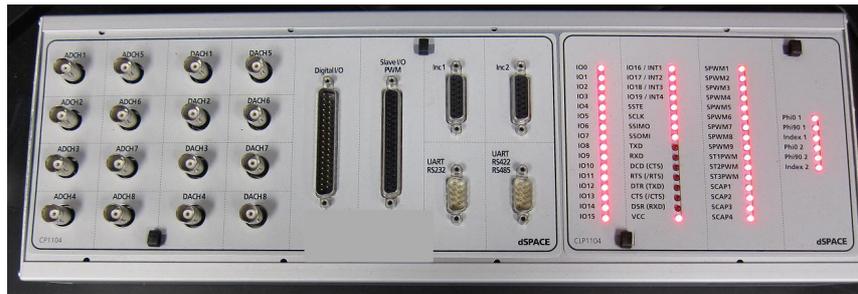


Figure 2.10 : le module de dSPACE

a. Domaines d'application :

Le système temps réel basé sur la technologie PowerPC et l'ensemble de ses interfaces d'E/S font de cette carte une solution idéale pour le développement de contrôleurs dans divers domaines, tels que le pilotage de machines, la robotique, La DS1104 est utilisée dans plusieurs laboratoires universitaires.

b. Avantages majeurs

La carte DS1104 fait de notre PC un système de développement puissant pour le prototypage rapide de lois de commande. L'interface Real-Time comporte des blocs Simulink pour la configuration graphique d'E/S. La carte peut être installée pratiquement dans tous les PC possédant un port PCI.

c. Constitution

Le DSPACE est équipé d'un DSP (Digital Signal Processor), il traite les signaux qu'on lui envoie et exécute le programme qu'on lui affecte. Il est couplé au logiciel d'interfaçage, le « ControlDesk ». C'est dans ce dernier que l'on va créer l'interface utilisateur. Ensuite il enverra au boîtier dSPACE les ordres et c'est le boîtier dSPACE qui crée physiquement les signaux électriques.

Afin de générer les signaux nécessaires, il faut réaliser un schéma sur la boîte à outils Simulink de Matlab.

d. L'environnement MATLAB-Simulink

Simulink est un environnement interactif intégré avec le noyau de calcul numérique MATLAB pour la modélisation, la simulation offline avec des schéma-blocs faciles à utiliser et un environnement de simulation dynamique, destiné principalement aux systèmes qui peuvent être décrits à l'aide d'équations différentielles.

L'intégration étroite du logiciel dSPACE et de l'outil de modélisation MATLAB/Simulink offre la plus grande efficacité de test possible.

Une bibliothèque spéciale « DS1104 Real Time Library » regroupe les différentes fonctions utiles pour gérer le DSP. A l'aide de la commande Build dans Simulation Parameters, on charge le code directement dans le DSP.

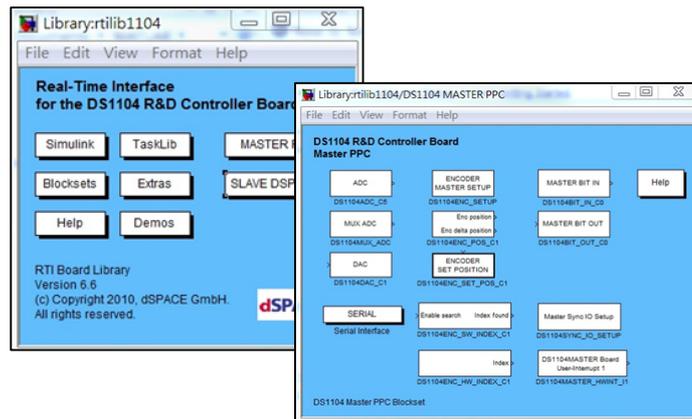


Figure 2.11: DS1104 Real Time Library

Dans notre cas, nous avons écrit un schéma bloc sous Simulink pour acquérir les données qui sont les tensions, les courants et la vitesse rotorique. C'est ensuite grâce à une interface gérant le module DSPACE que nous pouvons piloter le moteur.

Les étapes à suivre sont :

- Elaboration de schéma bloc sous Simulink.
- Compilation de ce dernier grâce au logiciel Matlab.
- Création de l'interface de contrôle avec le logiciel controldesk.

De plus, un module DSPACE est intégré dans Simulink et permet d'utiliser des fonctions de traitement qui sont propre au module dSPACE.

2.3.2 Détermination du moment d'inertie

Avant de déterminer le moment d'inertie il faut d'abord résoudre le problème de mesure de la vitesse du moteur pour cela on a utilisé un codeur incrémental de marque **BAUMER GI355**.

➤ Le codeur incrémental

Le contrôle du déplacement et de la vitesse d'un mobile est un problème couramment rencontré sur un grand nombre de systèmes automatisés. Le codeur rotatif est un capteur de position angulaire. Lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne, son axe fait tourner un disque qui lui est solidaire. Ce disque comporte une succession de parties opaques et transparentes.

Une lumière émise par des diodes électro-lumineuses, traverse les fentes de ce disque et crée sur les photodiodes réceptrices un signal analogique. Une interface électronique (qui est incluse dans le codeur) amplifie ce signal puis le convertit en signal carré qui est alors transmis à un système de traitement.



Figure 2.12: Codeur incrémental GI355

La périphérie du disque du codeur est divisée en "x" fentes régulièrement réparties. Un faisceau lumineux se trouve derrière ces fentes, dirigé vers une diode photosensible. Chaque fois que le faisceau est coupé, le capteur envoie un signal qui permet de connaître la variation de vitesse de l'arbre. Pour connaître le sens de rotation du codeur, on utilise un deuxième faisceau lumineux qui sera décalé par rapport au premier. Le premier faisceau qui enverra son signal indiquera aussi le sens de rotation du codeur.

L'axe du codeur est lié mécaniquement à l'arbre de la machine qui l'entraîne. Cet axe fait tourner un disque qui lui est solidaire.

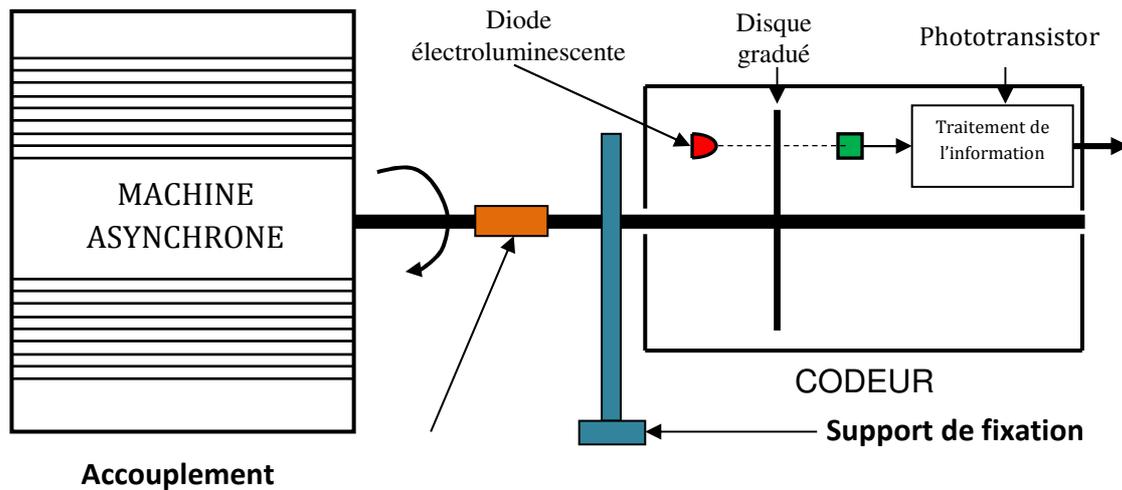


Figure 2.13 : Montage moteur avec codeur incrémental

La fixation du codeur incrémental a été faite par un support usiné par un tourneur de façon à ne pas avoir des vibrations.

Après avoir résolu le problème de mesure de la vitesse maintenant on peut passer au calcul du moment d'inertie J à l'aide de l'essai de ralentissement.

Pour ce là on alimente la machine asynchrone sous sa tension nominale puis on coupe l'alimentation et on enregistre le décroissement de la vitesse sur un PC via une carte d'acquisition.

Le résultat sur le graphe suivant :

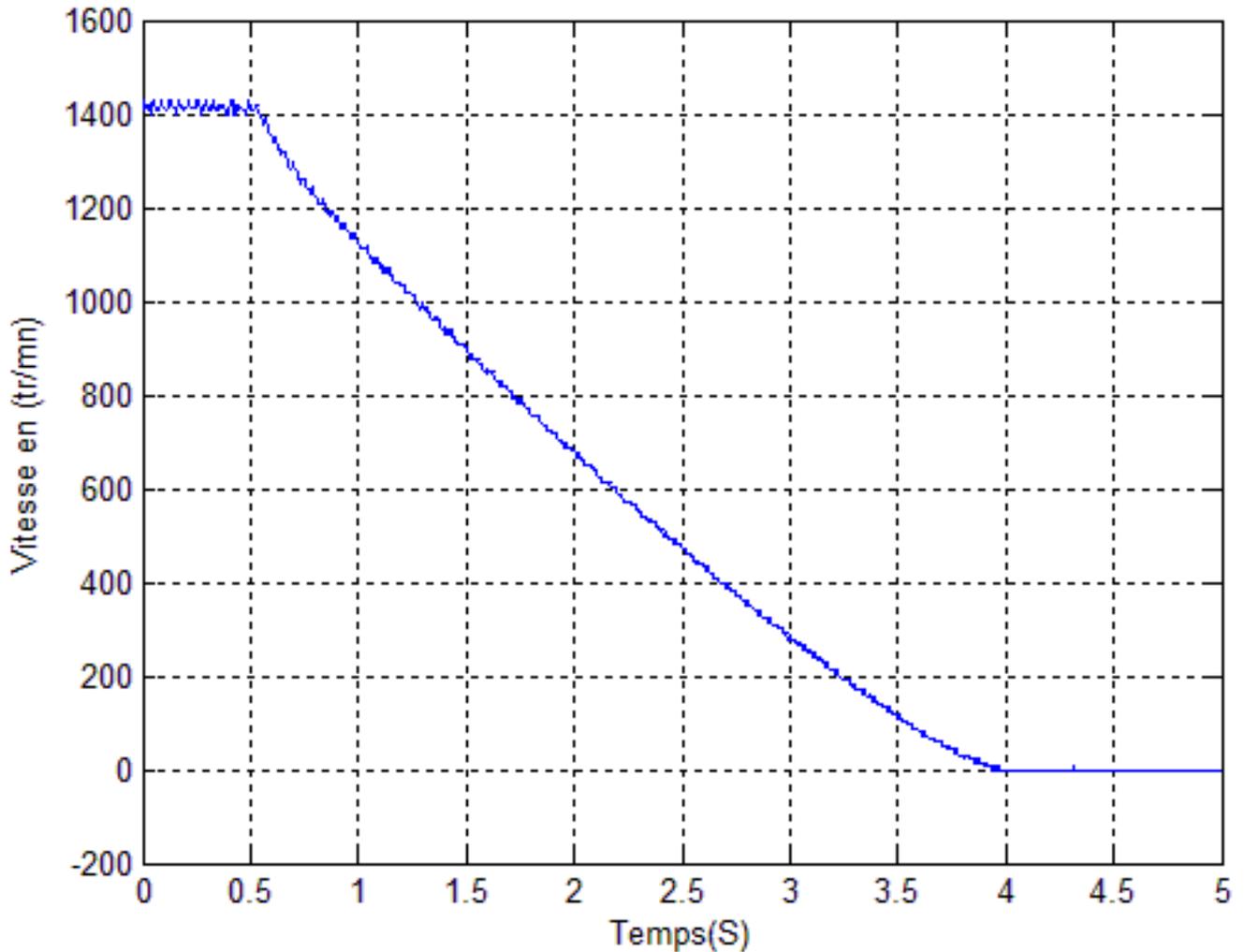


Figure 2.14 : l'essai de ralentissement

En régime permanent à vide, il est légitime de considérer que le couple résistant n'est dû qu'aux frottements visqueux.

Pour calculer le moment d'inertie on utilise la relation suivante :

$$J = \frac{P_{mec}}{\Omega_n \left(\frac{d\Omega}{dt} \right)_{\Omega=\Omega_n}} \quad (2.14)$$

Cette relation montre que la mesure du moment d'inertie J dépend de la précision avec laquelle la puissance mécanique est déterminée précédemment.

$$P_{méca} = 21.375 \text{ W}$$

Le relevé de la courbe de ralentissement et son approximation par une fonction analytique permet de calculer la dérivée de la vitesse.

$$\frac{d\Omega}{dt} = 2\pi \frac{\Delta N}{\Delta t} \frac{1}{60} \Omega_n = 2\pi \frac{N_n}{60} \quad (2.15)$$

Application numérique : avec les valeurs suivantes :

$$P_{méca} = 21.375 \text{ W}$$

$$\Delta N = N = 1420 \text{ tr/mn}$$

$$\Delta t = 3.5 \text{ s}$$

$$\text{On trouve : } J = 0.00238 \text{ Kg m}^2$$

2.3.3 Détermination du coefficient de frottement K_f :

Pour calculer le coefficient de frottement nous avons :

$$J = 0.00338 \text{ Kg m}^2$$

On commence par l'équation mécanique de la vitesse :

$J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega = 0$, est une équation différentielle de 1^{er} ordre. Sa solution générale a la forme suivante :

$$\text{A } t = 0, \Omega(0) = \Omega_0$$

$$\Omega = \Omega_0 e^{-t/T_m} \quad \text{Avec } T_m = \frac{J}{K_f} \quad (2.16)$$

Ce qui permet de déduire le coefficient de frottement visqueux K_f .

L'équation de la droite (AB) est donnée par :

$$\Omega(t) = \Omega_0 - (\Omega_B - \Omega_0)t/t_B \quad (2.17)$$

$$\text{A l'instant } t = T_m \quad \Omega(T_m) = 0$$

$$\text{Donc } T_m = \frac{\Omega_0 T_B}{(-\Omega_B + \Omega_0)} \quad \text{tel que : } \Omega_B = \frac{\Omega_0}{e}$$

$$\Omega_0 = 1420 \text{ tr/mn} \quad \Omega_0/e = 523.98 \text{ tr/mn} \quad T_B = 1.8 \text{ s}$$

On trouve : $T_m = 2.852 \text{ s}$

Alors $K_f = 1.184 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

2.4 Résultats des paramètres identifiés :

Les paramètres identifiés par les essais classiques sont représentés dans le tableau suivant :

Les paramètres identifiés	La valeur
R_s	1.79Ω
R_r	0.15Ω
L_r	0.609 H
L_s	0.609 H
M_{sr}	0.603 H
J	0.00238 Kg m^2
K_f	$1.184 * 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

Tableau 2.5 : les paramètres identifiés

La comparaison entre les résultats simulés et expérimentaux

➤ La validation des résultats

Dans cette partie une phase de simulation est nécessaire afin de vérifier la validité du modèle par la comparaison entre les résultats de simulation et les signaux expérimentaux.

Les courbes obtenues sont représentés ci-dessous :

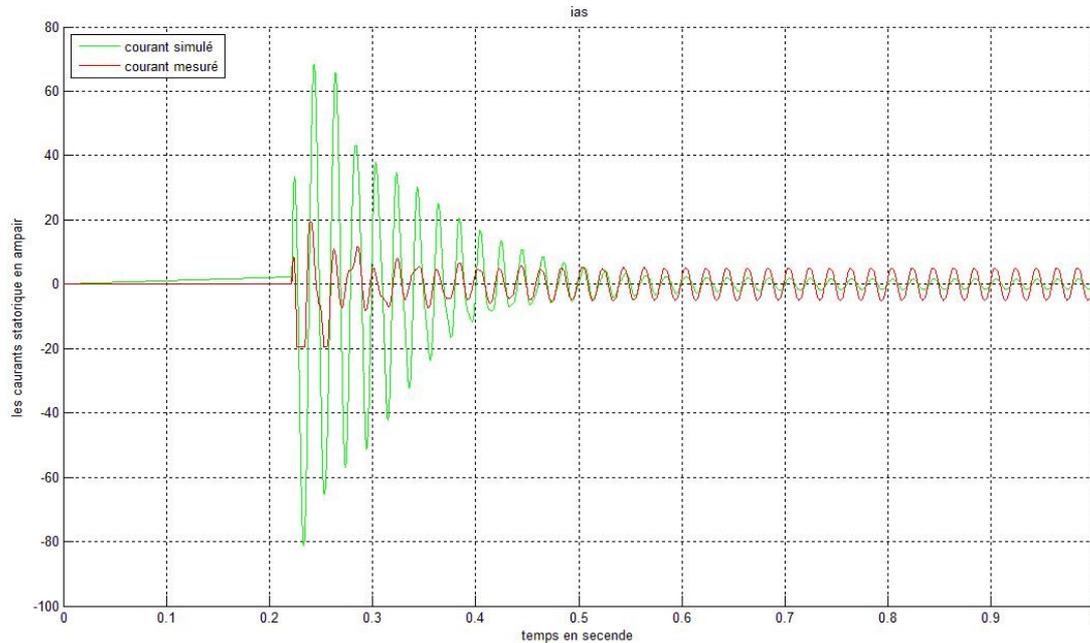


Figure 2.15 : comparaison entre le courant i_{as} simulé et mesuré.

On remarque qu'il y a une concordance entre le courant simulé et le courant mesuré. On constate cependant qu'il subsiste un certain écart pendant la durée du régime transitoire. Cet écart subsiste dans le régime permanent mais il est réduit.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone à cage d'écurueil à partir des essais classiques. Ensuite nous avons simulé les différents fonctionnements de la machine à base de ces paramètres, nous avons remarqué une concordance en régime permanent par contre en régime transitoire quelques différences, ceci peut s'expliquer par les erreurs de mesure et de lecture commises lors des tests, les hypothèses émises lors de l'élaboration du modèle, et enfin les essais classiques utilisés pour l'identification qui ne sont pas en réalité très performants.

Pour cela on essaiera d'améliorer ces paramètres par optimisation et minimisation de l'erreur par un algorithme d'optimisation qui est « l'algorithme génétique ».

3.1 Introduction

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes inspirés de la théorie darwinienne. Cette théorie repose sur deux postulats simples:

- "Dans chaque environnement, seules les espèces les mieux adaptées perdurent au cours des temps, les autres étant condamnées à disparaître".
- "Au sein de chaque espèce, le renouvellement des populations est essentiellement dû aux meilleurs individus de l'espèce".

Ce sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle, à savoir les croisements, les mutations, la sélection, etc.

Les champs d'application des AG sont très vastes. Les raisons du grand nombre d'applications sont la simplicité et l'efficacité de ces algorithmes. Les AG sont basés sur des mécanismes très simples, ils sont robustes car ils peuvent résoudre des problèmes fortement non linéaires et discontinus, et efficaces car ils font évoluer non pas une solution mais toute une population de solutions potentielles.

Les AG sont basés sur une approche itérative. En cela, peu d'information est nécessaire pour leur utilisation: l'espace de recherche possible et un critère d'efficacité correspondant au fitness.

Ces algorithmes utilisent un vocabulaire similaire à celui de la génétique, cependant, les processus auxquels ils font référence sont beaucoup plus complexes. Le principe des algorithmes génétiques repose sur une analogie entre un individu dans une population et la solution d'un problème parmi un ensemble de solutions potentielles: un individu (une solution) est caractérisé par une structure génétique s'appelle génotype ou chromosome de l'individu (codage des solutions du problème). Selon les lois de survie énoncées par Darwin, seuls les individus les plus forts (les meilleures solutions) survivront et pourront donner une descendance. Les opérateurs de croisement et de mutation (recombinaison et mutation des codages des solutions) permettent de se déplacer dans l'espace des solutions du problème. A partir d'une population initiale et après un certain nombre de générations, on obtient une population d'individus forts, c'est-à-dire de bonnes solutions se rapprochant de la solution optimale du problème considéré.

3.2 Analogie avec le modèle biologique

Afin de bien comprendre les algorithmes génétiques, il faudra d'abord connaître leur vocabulaire. Ceci sera résumé dans le tableau (3.1)

VOCABULAIRE	EN BIOLOGIE	EN OPTIMISATION
Chromosome	Support physique des informations héréditaires (caractéristique) d'un organisme vivant	Chaîne codée représentant une solution potentielle appelée également "individu"
Gène	Représente une caractéristique (le gène de la couleur des yeux)	Un ou plusieurs bits codant une information
Allèle	La valeur d'une caractéristique (bleu pour la couleur des yeux)	Valeur de la suite des bits (010 représente un entier sa valeur est 2)
Locus	La position du gène dans le chromosome	Position de bloc de bits dans la chaîne binaire
Génotype	L'ensemble des gènes (matériel génétique)	Structure qui code la chaîne (ensemble de paramètre)
phénotype	L'organisme formé par l'interaction de l'ensemble du matériel génétique	La structure décodée, ou un point de l'espace de solution

Tableau 3.1 : Analogie entre le modèle biologique et le modèle d'optimisation

3.3 Principe de fonctionnement

Un algorithme génétique, cherche les extrêmes d'une fonction définie sur un espace de recherche, appelé population initiale.

Donc, on commence par générer une population d'individus de façon aléatoire. Pour passer d'une génération k à la génération $k+1$, les trois opérations de sélection, croisement et mutation sont répétés pour des éléments de la population k .

Des couples de parents X_1 et X_2 sont sélectionnés en fonction de leur adaptation. L'opérateur de croisement leur est appliqué avec une probabilité P_c et génère des couples d'enfants E_1 et E_2 . D'autres éléments X sont sélectionnés en fonction de leurs adaptations. L'opérateur de mutation leur est appliqué avec la probabilité P_m et génère des individus mutés X' . Le niveau d'adaptation des enfants (E_1, E_2) et des individus mutés X' sont ensuite évalués avant insertion dans la nouvelle population. De génération en génération, la taille de la population reste constante [5].

L'organigramme de la figure (3.1) représente les différentes phases d'un algorithme génétique.

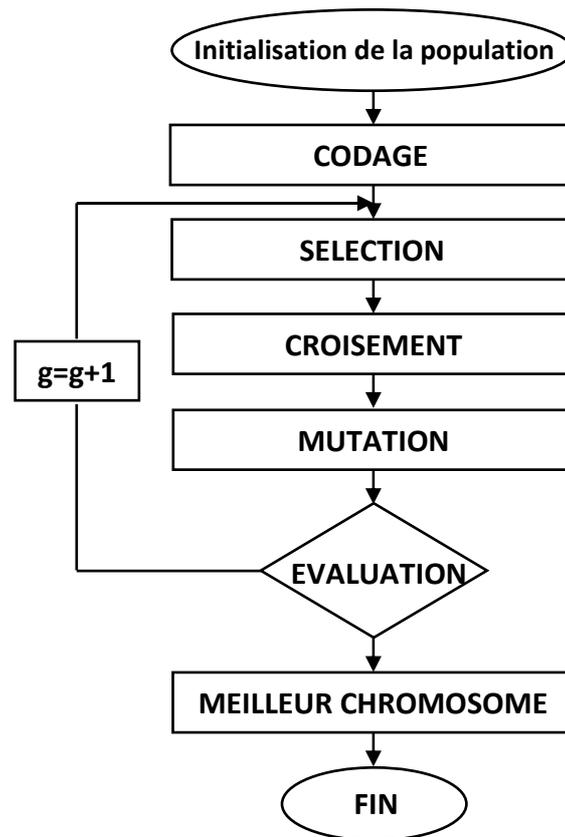


Figure 3.1 : Organigramme général d'un algorithme génétique

Plusieurs critères d'arrêt de l'algorithme peuvent être choisis:

- Le nombre de générations que l'on souhaite exécuter peut être fixé a priori.
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus.
- L'algorithme peut être arrêté lorsqu'on obtient une valeur acceptable de l'erreur.
- Etc.

3.3.1 Paramètres importants d'un AG

a. Génération de la population initiale:

C'est le choix des dispositifs de départ que nous allons faire évoluer. On pourrait prendre des individus régulièrement répartis dans l'espace. Néanmoins, une initialisation aléatoire est plus simple à réaliser: les valeurs des gènes sont tirées au hasard selon une distribution uniforme [6].

b. Taille de la population:

La taille d'une population doit éviter les extrêmes. Par exemple, une population trop petite évoluera probablement vers un optimum local peu intéressant. Ainsi, son espace de recherche ne comportera que très peu de solutions et l'AG ne convergera pas vers une solution optimale. Par opposition, une population trop grande sera inutile car le temps de convergence sera excessif. Une population de bonne taille aura pour conséquence de prévenir la convergence prématurée de l'algorithme.

La taille de la population doit être choisie de façon à réaliser un bon compromis entre le temps de calcul et la qualité du résultat [6].

c. Le codage:

Chaque paramètre d'une solution est assimilé à un gène, toutes les valeurs qu'il peut prendre sont les allèles de ce gène, on doit trouver une manière de coder chaque allèle différent de façon unique (établir une bijection entre l'allèle "réel" et sa représentation codée).

Un chromosome est une suite de gènes, on peut par exemple de regrouper les paramètres similaires dans un même chromosome et chaque gène sera repérable par sa position: son locus sur le chromosome en question.

Chaque individu est représenté par un ensemble de chromosomes, et une population est un ensemble d'individus [6].

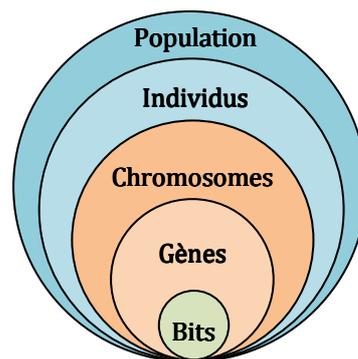


Figure 3.2 : les niveaux d'organisation d'un algorithme génétique

Il y a trois principaux types de codage utilisables, et on peut passer de l'un à l'autre relativement facilement:

- Le codage binaire.
- Le codage réel.
- Le codage par valeurs.

➤ **Le codage binaire:**

Chaque gène dispose du même alphabet binaire {0 ou 1}.

Un gène est alors représenté par un certain nombre de bits dépend de l'application, les chromosomes qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes, et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes.

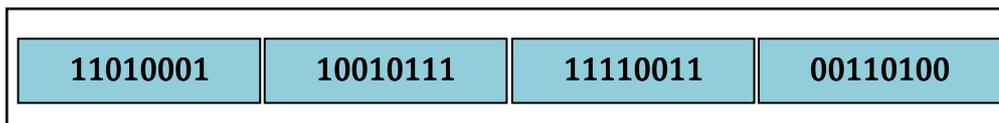


Figure 3.3 : Représentation d'un chromosome codé en binaire

➤ **Le codage par permutation de valeur entière:**

Le gène est codé par une valeur entière dans un ensemble de cardinalité égale au nombre de gènes.

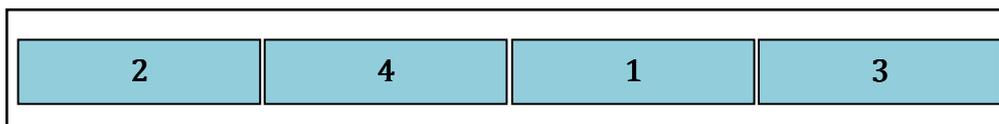


Figure 3.4 : Représentation d'un chromosome codé par PVE

➤ **Le codage par valeurs:**

Le gène est codé par une valeur prise dans un ensemble fini ou infini. Ce codage est généralement utilisé pour des valeurs qu'on ne peut pas mettre sous la forme d'un des deux codages précédents. Ces valeurs sont bien entendu liées au problème à résoudre.

A	N	F	G
Bleu	Rouge	Vert	Noire
25.56	40.38	99.00	02.69

Figure 3.5 : Représentation d'un chromosome codé par valeurs

3.3.2 L'évaluation

L'évaluation de chaque dispositif est réalisée par le modèle utilisé. Si le dispositif possède plusieurs états de fonctionnement, le modèle peut être lancé plusieurs fois. Les résultats obtenus sont alors utilisés pour calculer les fonctions objectives.

La fonction d'adaptation, ou fitness, associe une valeur pour chaque individu. Cette valeur a pour but d'évaluer si un individu est mieux adapté qu'un autre à son environnement. Ce qui signifie qu'elle quantifie la réponse fournie au problème pour une solution potentielle donnée. Ainsi les individus peuvent être comparés entre eux.

Cette fonction, propre au problème, et souvent simple à formuler lorsqu'ils sont corrélés, elle est plus difficile à définir. Dans ce cas, la fonction devient une somme pondérée de plusieurs fonctions. Un ajustement de coefficient est alors nécessaire [7].

3.3.3 Les opérateurs génétiques

Les algorithmes génétiques sont basés sur un phénomène naturel: l'évolution. Plus précisément, ils supposent, qu'a priori, deux individus adaptés à leur milieu donnent, par recombinaison de leurs gènes, des individus mieux adaptés. Pour ce faire, trois opérateurs sont à disposition: la sélection, le croisement et la mutation [7].

3.3.3.1 La sélection:

La sélection sert à choisir dans l'ensemble de la population les individus qui participeront à la reproduction. La probabilité de sélection de chaque individu(i) est :

$$ps(i) = \frac{fe(i)}{\sum_{i=1}^N fe(i)}$$

Avec : $ps(i)$: la probabilité de sélection de l'individu (i).

$fe(i)$: Fonction d'évaluation (fitness) de l'individu (i).

N : la taille de la population.

Il existe plusieurs méthodes de sélection. Nous présenterons les quatre plus connues:

- ⇒ La sélection par tournois.
- ⇒ La sélection par rang.
- ⇒ La méthode d'élitisme.
- ⇒ La méthode de la roulette Wheel (loterie biaisée).

a. La sélection par tournois:

Cette méthode est celle avec laquelle on obtient les résultats les plus satisfaisants. Le principe de cette méthode est le suivant : on effectue un tirage avec remise de deux individus de P , et on les fait "combattre". Celui qui a la fitness la plus élevée l'emporte avec une probabilité P comprise entre 0.5 et 1. On répète ce processus n fois de manière à obtenir les n individus de P' qui serviront de parents.

La variance de cette méthode est élevée et le fait d'augmenter ou de diminuer la valeur de P permet respectivement de diminuer ou d'augmenter la pression de la sélection [7].

b. La sélection par rang:

La sélection par rang est une variante du système de roulette. Il s'agit également d'implémenter une roulette, mais cette fois ci les secteurs de la roue ne sont plus proportionnels à la qualité des individus, mais à leur rang dans la population triée en fonction de la qualité des individus.

D'une manière plus parlante, il faut trier la population en fonction de la qualité des individus puis leur attribuer à chacun un rang. Les individus de moins bonne qualité obtiennent un rang faible (à partir de 1). Et ainsi en itérant sur chaque individu on finit par attribuer le rang N au meilleur individu (où N est la taille de la population). La suite de la méthode consiste uniquement en l'implémentation d'une roulette basée sur les rangs des individus. L'angle de chaque secteur de la roue sera proportionnel au rang de l'individu qu'il représente [7].

c. La méthode d'élitisme:

Cette méthode consiste à sélectionner les N individus dont on a besoin pour la nouvelle génération G en prenant les N meilleurs individus de la population P après l'avoir triée de manière décroissante selon la fitness de ses individus.

Il est inutile de préciser que cette méthode est encore pire que celle de la loterie biaisée dans le sens où elle amènera à une convergence prématurée encore plus rapidement et surtout de manière encore plus sûre que la méthode de sélection de la loterie biaisée. En effet, la pression de la sélection est trop forte, la variance nulle et une diversité moins importante, du moins le peu de diversité qu'il pourrait y avoir ne résultera pas de la sélection mais plutôt du croisement et de la mutation [7].

d. La méthode roulette Wheel (loterie biaisée):

Cette méthode est la plus connue et la plus utile. Avec cette méthode chaque individu a une chance d'être sélectionné proportionnelle à sa performance, donc plus les individus sont adaptés au problème, plus ils ont de chances d'être sélectionnés. Pour utiliser l'image de la "roue du forain", chaque individu se voit attribuer un secteur dont l'angle est proportionnel à son adaptation (fitness) [7].

On fait tourner la roulette et quand elle cesse de tourner on sélectionne l'individu correspondant au secteur désigné par une sorte de "curseur", curseur qui pointe sur un secteur particulier de ceci après qu'elle se soit arrêtée de tourner.

Cela peut être simulé par l'algorithme suivant :

- On calcule la somme $S1$ de toutes les fonctions d'évaluation d'une population.
- On génère un nombre r entre 0 et $S1$.
- On calcule ensuite une somme $S2$ des évaluations en s'arrêtant dès que r est dépassé.
- Le dernier chromosome dont la fonction d'évaluation vient d'être ajoutée est sélectionné.

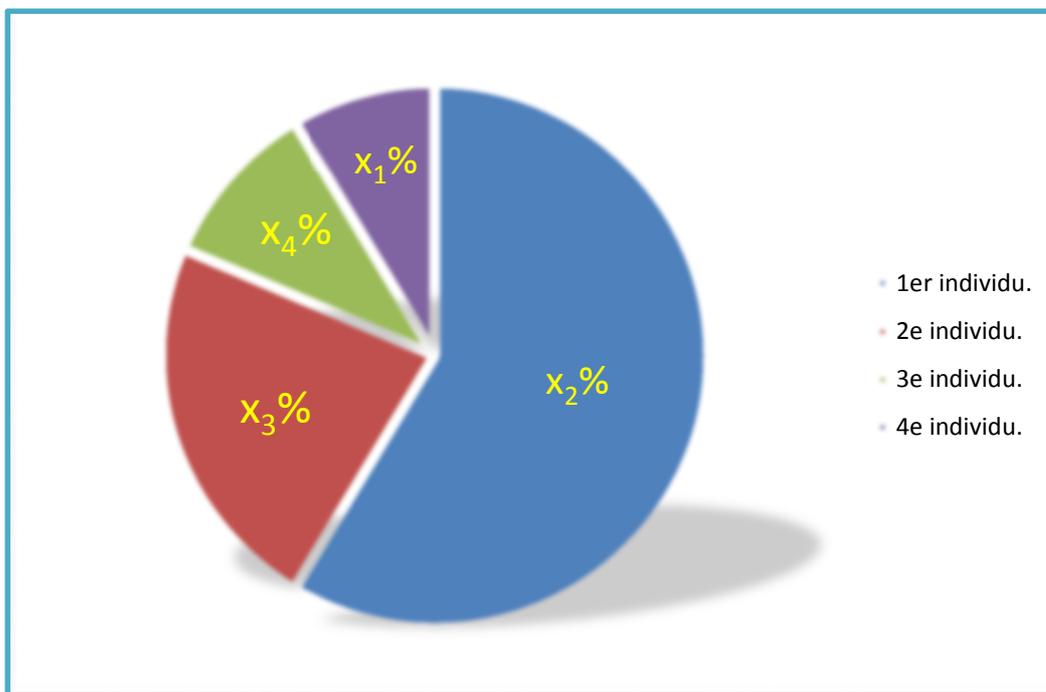


Figure 3.6: Répartition des probabilités de sélection des individus sur la roulette *Wheel*

3.3.3.2 Opérateurs de croisement:

L'opérateur de croisement réalise la reproduction entre les individus de la population et représente l'étape clef de l'AG. Il peut être effectué de plusieurs manières :

Le croisement à un point de coupure.

Le croisement en deux points.

Le croisement uniforme.

Les figures (3.6), (3.7) et (3.8) illustrent un croisement en un point, en deux points, et croisement uniforme.

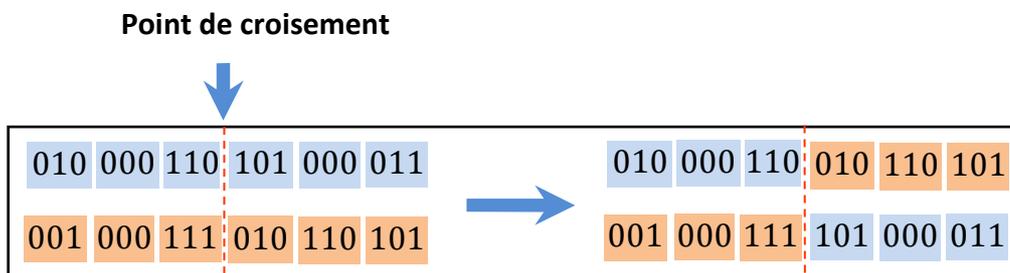


Figure 3.7 : Croisements en un point

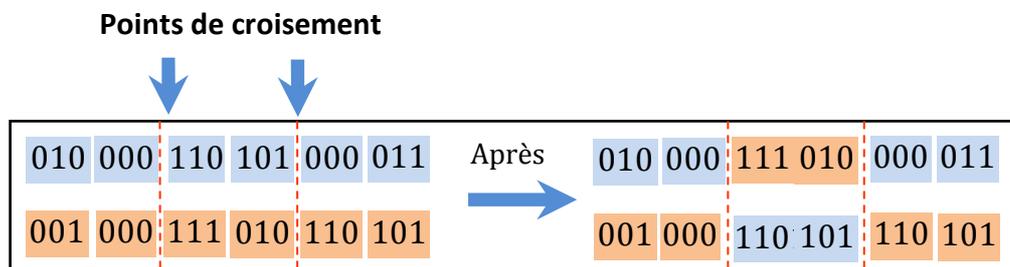


Figure 3.8 : Croisement en deux points

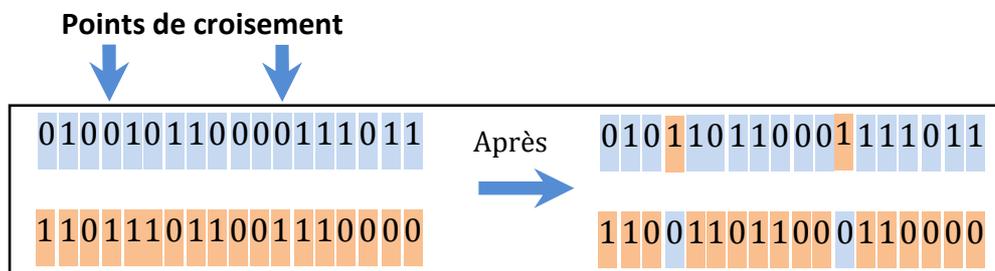


Figure 3.9 : Croisement uniforme

Le choix d'une méthode de croisement est souvent limité par la nature même du problème, sinon c'est l'utilisateur de faire le bon choix, ce qui n'est pas une tâche simple. Un taux de croisement élevé peut être bon pour l'exploitation de solutions de même type,

surtout vers les dernières générations, pour conserver une bonne convergence vers une solution unique.

Par contre, un taux de croisement élevé dans les premières générations peut engendrer soit une convergence prématurée de l'algorithme vers un minimum local ou retarder la convergence, car de bons individus risquent d'être croisés trop rapidement par rapport à l'amélioration que la sélection peut apporter. Un taux faible appliqué tout au long de l'algorithme risque fort de donner une convergence prématurée à cause du faible taux d'échange entre les individus.

Si la probabilité de croisement est de 100%, alors toute la population participe au croisement. Par contre, si elle est de 0%, la nouvelle génération au complet est la copie exacte des individus de l'ancienne population. Ceci ne signifie pas que la nouvelle génération est forcément identique. En effet, la nouvelle population n'a pas seulement été modifiée par l'opérateur de croisement, mais également par l'opérateur de mutation et de sélection, ce qui occasionne des changements dans la nouvelle population.

Pratiquement la probabilité de croisement est comprise entre 0.1 et 0.9.

3.3.3.3 Opérateurs Mutation:

L'opérateur de mutation a comme objectif de modifier de façon aléatoire certains individus de la population pour prévenir la convergence prématurée.

Cet opérateur consiste à changer la valeur aléatoire d'un gène avec une probabilité p_m généralement comprise entre 0.01 et 0.001. On peut aussi prendre $p_m = 1 / l_g$ où l_g est la longueur de la chaîne de bits codant notre chromosome.

Une mutation consiste simplement en l'inversion d'un bit (ou de plusieurs bits, vu la probabilité de mutation c'est extrême rare) se trouvant en un locus bien particulier et qui lui est déterminé de manière aléatoire, on peut donc résumer la mutation de la façon suivante :

L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein de notre population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un "élément perturbateur", il introduit du "bruit" au sein de la population. En effet, une mutation pouvant intervenir de manière aléatoire au niveau de n'importe quel locus, on a la certitude mathématique que n'importe quel permutation de notre chaîne de bits peut apparaître au sein de la population et donc que tout point de l'espace de recherche peut être atteint.

Tout comme le choix d'une méthode de croisement, c'est la nature même du problème qui dicte le choix de l'opérateur de mutation, sinon c'est à l'utilisateur de faire le bon choix.

Un taux de mutation élevé peut être très bon dans l'exploration de nouvelles solutions pour les premières générations de l'algorithme. Par contre, ce même taux est défavorable lorsque l'algorithme est proche de la solution optimale. Un taux de mutation plus petit est requis pour les dernières générations afin d'éviter une solution sous optimale.

L'application d'un taux de mutation élevé tout au long de l'algorithme occasionne une trop grande diversité génétique, c'est-à-dire que l'exploration de nouvelles solutions est trop grande et que l'algorithme ne peut plus converger. Lorsque le taux de mutation est beaucoup trop faible, la recherche risque de stagner à cause du faible taux d'exploitation. Toutefois, un taux faible permet d'éviter cette dispersion génétique et n'entraîne que quelques modifications sur un nombre limité d'individus.

S'il n'y a aucune mutation, les individus qui sont produits juste après le croisement ne comportent aucun changement. Par contre, si la probabilité de mutation est de 100%, l'individu entier est changé et l'optimisation se transformera en recherche aléatoire.

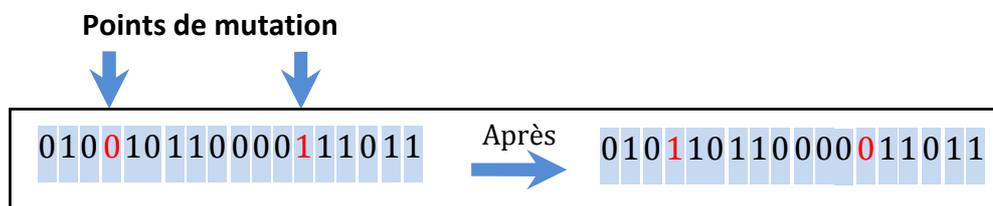


Figure 3.10: mutation de deux bits

3.4 Applications

Les applications des algorithmes génétiques sont multiples:

- Optimisation de fonctions numériques difficiles (discontinues, bruitées...).
- Traitement d'image (alignement de photos satellites, reconnaissance de suspects...).
- Optimisation d'emplois du temps.
- Optimisation de design.
- Contrôle de systèmes industriels.
- Apprentissage des réseaux de neurones.

➤ etc.

Les algorithmes génétiques peuvent être utilisés pour contrôler un système évoluant dans le temps (chaîne de production...) car la population peut s'adapter à des conditions changeantes. En particulier, ils supportent bien l'existence de bruit dans la fonction à optimiser.

3.5 Conclusion

Un algorithme génétique nous donne une grande liberté dans le paramétrage et dans l'implémentation des différents traitements. Libre à nous ensuite de modifier tel ou tel paramètre si les solutions obtenues ne nous conviennent pas.

Les algorithmes génétiques ont l'énorme avantage de pouvoir être appliqués dans un grand nombre de domaines de recherche de solution, lorsqu'il n'est pas nécessaire d'avoir la solution optimale, qui prendrait par exemple trop de temps et de ressources pour être calculée (ou tout simplement si personne n'est capable de la trouver de manière théorique).

Les algorithmes génétiques sont aussi particulièrement adaptés à l'évaluation de problèmes multicritères et à la réalisation de recherches de valeurs optimales selon plusieurs objectifs simultanés.

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous déterminons simultanément les paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone en appliquons l'algorithme génétique.

4.2 Identification des paramètres :

L'identification consiste à déterminer les paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone par la minimisation de l'erreur quadratique (ε) entre les résultats de la simulation et l'expérimentales, comme il montre le schéma de principe de l'identification par l'application de l'algorithme génétique :

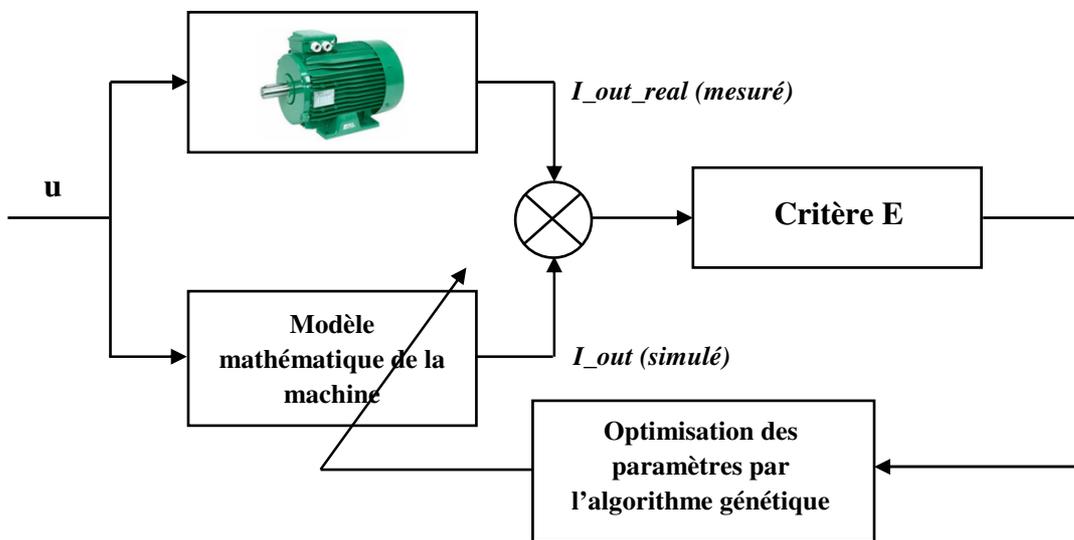


Figure 4.1 : Principe d'identification par modèle de référence

4.3 Le codage des chromosomes :

Une solution (chromosome) est la suite des paramètres recherchés, organisés dans un seul vecteur et chaque paramètre est repérable par sa position.

Dans le cas de notre machine asynchrone, la solution contient les paramètres suivants :

R_s : Résistance statorique.

R_r : Résistance rotorique

L_s : Inductance statorique

L_r : Inductance rotorique

M_{sr} : Inductance mutuelle.

K_f : Coefficient de frottement

J : Moment d'inertie de la partie tournante de la machine

Dans notre cas, ces paramètres sont codés en binaire, ensuite on a calculé le nombre de bit nécessaire pour le codage de chaque paramètre dans le chromosome.

4.4 La génération de la première population :

On a générer une première population dont la taille et le contenu sont aléatoires. La prochaine population et les différentes probabilités (de croisement et mutation) permettent d'optimiser ces paramètres et donc diminuer le temps de calcul.

La pré-connaissance des intervalles de variation des paramètres de la MAS permet d'initialiser le meilleur chromosome afin de garantir la convergence de l'algorithme pour obtenir les paramètres exacts de la machine et aussi de minimiser le temps de calcul.

4.5 Evaluation de la population :

L'évaluation de chaque individu a été effectuée en calculant l'erreur quadratique entre deux signaux :

- Le premier I_{out_real} est donné par les mesures.
- Le deuxième I_{out} est obtenu à partir du modèle mathématique de la machine asynchrone.

Pour calculer l'erreur nous avons utilisé la formule de la différence euclidienne

Telle que :

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^k (I_{out_real})^2 - \sum_{n=1}^k (I_{out})^2} \quad (4.1)$$

Avec :

N : la taille du vecteur du temps.

Les essais sont réalisés sur une machine asynchrone triphasée ayant les caractéristiques suivantes :

Puissance : 3 kW, 220/380 V, fréquence : 50Hz.

a. Les schémas bloc Simulink :

La figure 4.6 représente le schéma bloc Simulink réalisé sous Matlab pour mesurer la vitesse de la machine asynchrone.

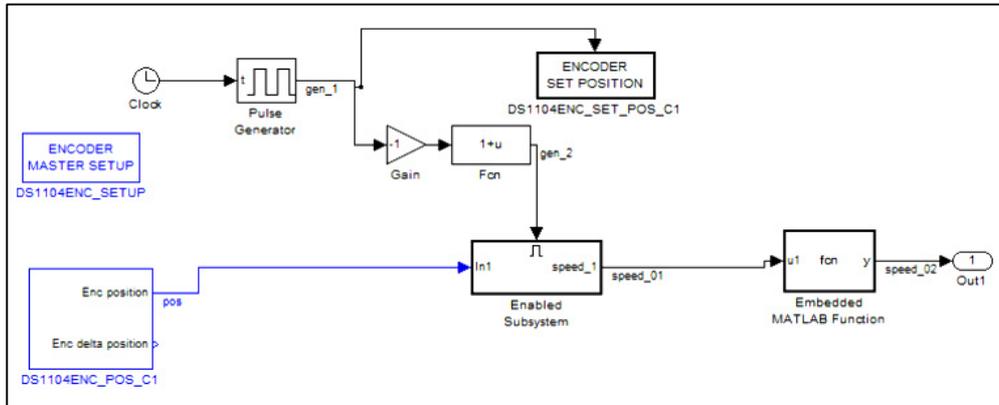


Figure 4.2: le schéma bloc Simulink pour mesurer la vitesse.

La figure 4.7 Représente le schéma bloc Simulink pour mesurer les tensions V_a , V_b et V_c . Pour cela nous avons utilisé le convertisseur analogique numérique multiplié (MUX-ADC), chaque voie est multipliée par un gain (G_{Va} , G_{Vb} , G_{Vc}). Ces gains sont déterminés par différentes mesures expérimentales.

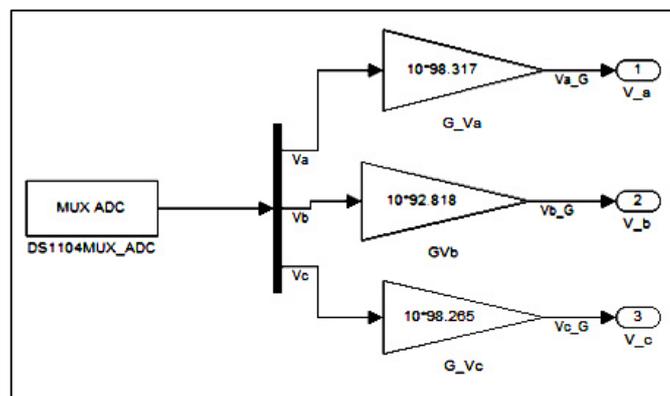


Figure 4.3 : représente le schéma bloc Simulink pour mesurer les tensions.

La figure 4.8 Représente le schéma bloc Simulink pour mesurer les courants I_a , I_b et I_c . Pour cela nous avons utilisé trois convertisseurs analogique numérique (ADC), chaque voie est multipliée par un gain (G_{Ia} , G_{Ib} , G_{Ic}). Ces gains sont déterminés par différentes mesures expérimentales.

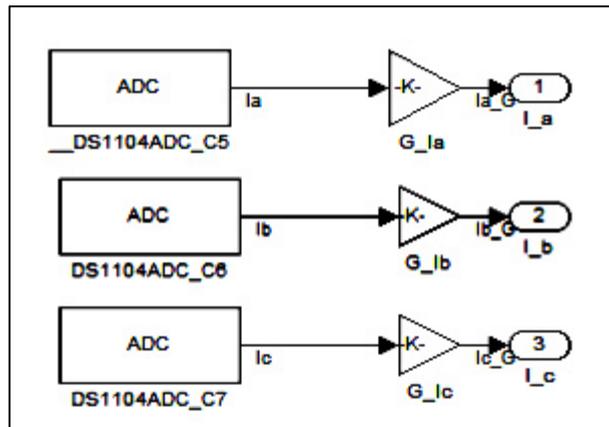


Figure 4.4 : le schéma bloc Simulink pour mesurer les courants.

b. L'environnement dSPACE

Real-Time Workshop génère à partir des schémas-blocs le code C qui est la base pour le traitement ultérieur dans notre Interface temps réel (RTI Real Time Interface).

Pour l'exploitation des données, dSPACE Simulator autorise un contrôle complet des expérimentations par le biais du ControlDesk, ce dernier peut être utilisé pour le développement et la réalisation des tests. Avec les instruments virtuels intégrés, il est possible de visualiser sur l'écran l'évolution de certaines grandeurs caractéristiques du système. On peut également constituer le tableau de bord de l'application permettant ainsi de visualiser et d'agir sur les paramètres de réglage du système.

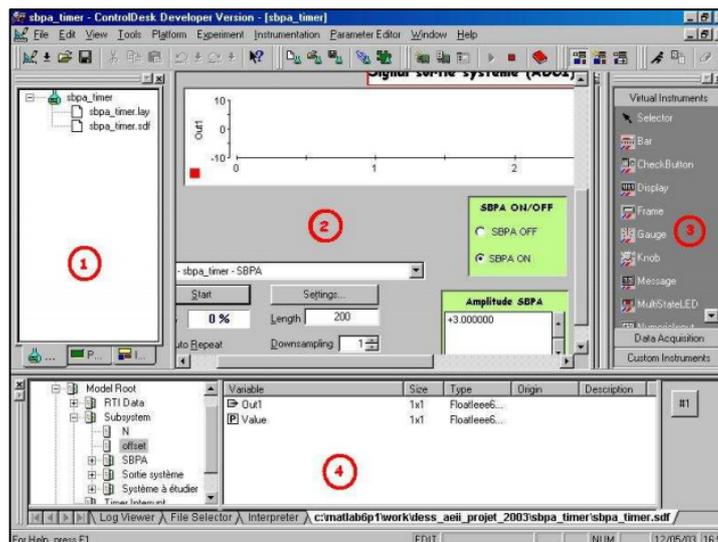


Figure 4.5 : Interface du logiciel Control Desk

Les différentes fenêtres rencontrées sur Control Desk sont :

1. Fenêtre de navigation (Navigator)
2. Aire de travail contenant la layout
3. Choix d'instrument (instrument selector)
4. Fenêtre d'outils (tool window).

4.6 La sélection

La sélection sert à choisir dans l'ensemble de la population des individus qui participeront au croisement et à la mutation.

La méthode utilisée pour la sélection est celle de la roulette, et la probabilité de sélection de chaque individu (i) s'écrit :

$$p_s(i) = \frac{fe(i)}{\sum_{i=1}^N fe(i)} \quad (4.2)$$

Avec cette méthode chaque individu a une chance d'être sélectionné proportionnelle à sa performance, donc plus les individus sont adaptés au problème, plus ils ont de chances d'être sélectionnés.

Avec : $P_s(i)$: La probabilité de sélection de l'individu (i).

$fe(i)$: Fonction d'évaluation (fitness) de l'individu(i).

N : la taille de la population.

4.7 Le croisement :

Le croisement permet de créer de nouvelles chaînes en échangeant de l'information entre deux chaînes. Le croisement s'effectue en deux étapes. D'abord les nouveaux éléments produits par la reproduction sont appariés, ensuite chaque paire de chaînes subit un croisement.

4.8 La mutation

La mutation est exécutée seulement sur une seule chaîne. Elle représente la modification aléatoire et occasionnelle de faible probabilité de la valeur d'un caractère de la chaîne, pour un codage binaire cela revient à changer un 1 par 0 et vice versa.

Cet opérateur introduit de la diversité dans le processus de recherche des solutions et peut aider l'algorithme génétique à ne pas stagner dans un optimum local.

4.9 Tests et résultats :

Dans cette partie, nous avons fait une série des tests pour obtenir le meilleur chromosome, et voici le résultat obtenu :

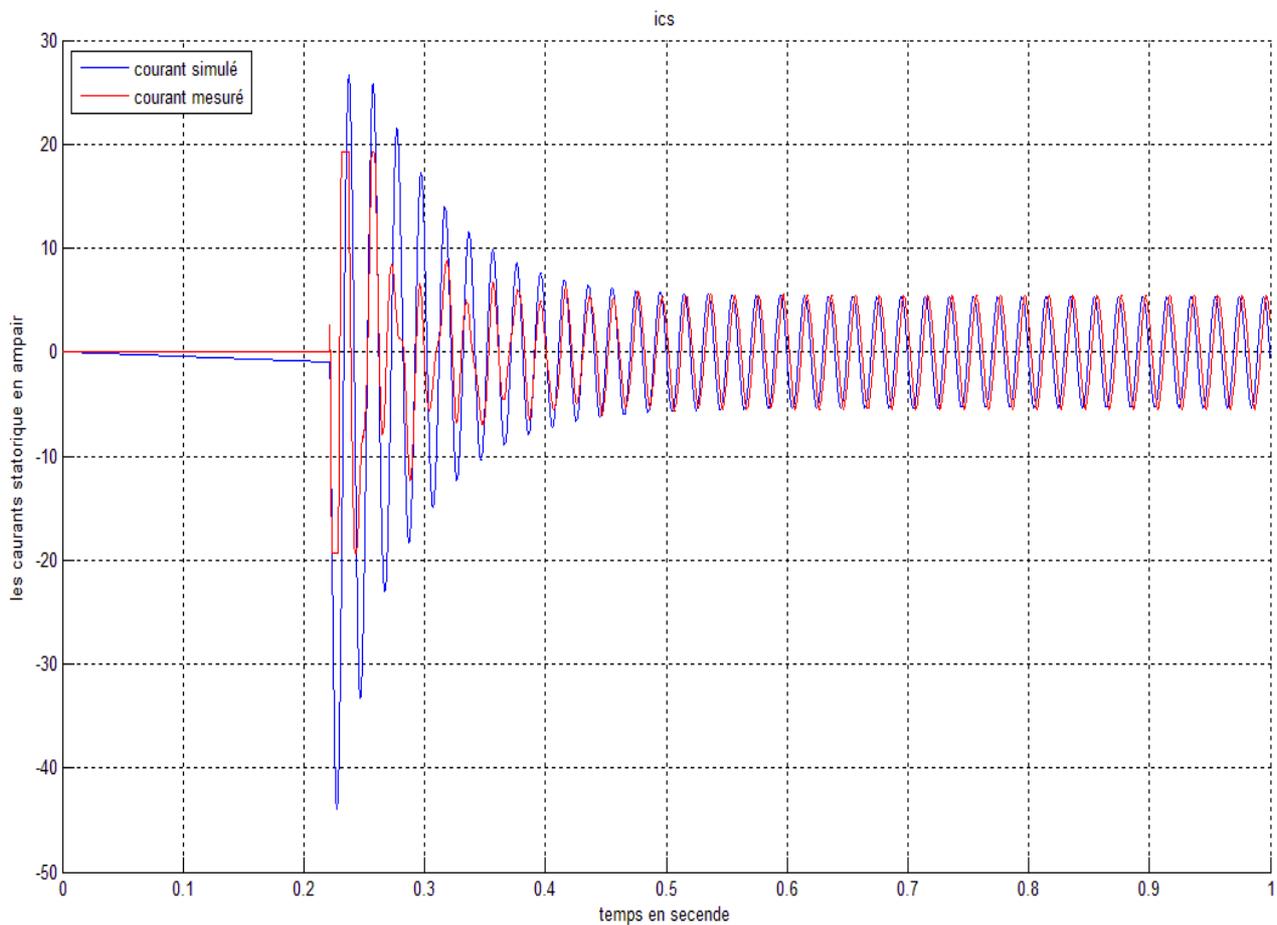


Figure 4.6 : superposition des deux courants : mesuré et simulé de la machine asynchrone

La figure montre la superposition des deux courants simulé et mesuré en régime permanent avec une légère différence dans le premier pic dans le régime transitoire qui est acceptable si on le compare avant l'application de l'algorithme génétique.

Meilleure chromosome

Après des centaines de tests nous avons obtenu le meilleur chromosome après l'application de l'algorithme génétique pour identifier la machine

Les paramètres identifiés par l'application de l'algorithme génétique après des centaines de tests sont représentés dans le tableau suivant :

Les paramètres identifiés	La valeur
R_s	1.771 Ω
R_r	0.3648 Ω
L_r	0.6979 H
L_s	0.703 H
M_{sr}	0.6871 H
J	0.00035 Kg m ²
K_f	0.0905 m ² /s

Tableau 4.1 : les paramètres obtenus par l'algorithme génétique.

4.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'application de l'algorithme génétique appliqué à la détermination des paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone. L'algorithme génétique est utilisé pour minimiser l'erreur quadratique entre le courant mesuré et celui fourni par un modèle de référence. Nous avons obtenus des résultats satisfaisants surtout dans le régime permanent, et cela après un nombre élevé de test.

Ce travail a été pour nous, le premier pas vers un monde nouveau et complexe, mais très intéressant. Notre recherche bibliographique dans les domaines de l'électronique, de l'électrotechnique et de l'informatique tel que «les machines asynchrones, l'identification expérimentale et les algorithmes génétiques », nous a permis d'enrichir nos connaissances et de développer notre base théorique.

A l'issue de notre projet, nous nous sommes intéressés à l'identification expérimentale et l'identification par l'application de l'algorithme génétique sur la machine asynchrone, nous avons :

- Étudié et modélisé la machine asynchrone.
- identifiée les paramètres de la machine à l'aide des essais expérimentaux (essai à vide, essai en court-circuit et ralentissement).
- exposé une étude sur les algorithmes génétiques et ses différents étapes.
- Appliqué ce dernier à la machine asynchrone pour identifier ses paramètres où le courant de démarrage et la tension correspondante ont été considérés comme des signaux d'entrée-sortie, tandis que l'erreur quadratique entre les courants mesurés et simulés est choisie comme critère d'arrêt de l'algorithme génétique.

Nous pouvons confirmer que l'objectif, fixé au départ, a pu être atteint et notre travail a satisfait les exigences déterminées au début.

Enfin, on peut dire qu'aujourd'hui que l'identification des paramètres de la machine asynchrone et l'application de l'algorithme génétique pour donner d'excellents résultats est certainement une approche qui a fait ses preuves.

Comme perspective a ce travail on peut proposer le test de l'algorithme génétique en changeant ses paramètres (la taille de la population, le nombre de bits du chromosome, le critère d'arrêt..etc), une autre perspective est de passer à la commande vectorielle ou à la commande DTC de la machine asynchrone.

Listes des acronymes et abréviations

- **MAS** : Machine asynchrone.
- **s** : indice d'axe s correspondant au stator
- **r** : indice d'axe s correspondant au rotor.
- **a,b,c** : Indices correspondantes au trois phases a,b,c.
- **V_{as}, V_{bs}, V_{cs}** : Tensions d'alimentation des phases statoriques.
- **V_{ar}, V_{br}, V_{cr}** : Tensions d'alimentation des phases rotoriques.
- **I_{as}, I_{bs}, I_{cs}** : courants statoriques.
- **I_{ar}, I_{br}, I_{cr}** : courants rotoriques.
- **Φ_{as}, Φ_{bs}, Φ_{cs}** : Flux statorique.
- **Φ_{ar}, Φ_{br}, Φ_{cr}** : Flux rotoriques.
- **L_{ss}** : La matrice des inductances statoriques.
- **L_{rr}** : La matrice des inductances rotoriques.
- **R_s, L_s** : Résistance et inductance propre d'une phase statorique.
- **R_r, L_r** : Résistance et inductance propre d'une phase rotorique.
- **M_{sr}, M_{rs}, M** : inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator.
- **M_s** : l'inductance mutuelle entre les phases statoriques
- **M_r** : l'inductance mutuelle entre les phases rotoriques.
- **θ_p** : angle électrique stator/rotor.
- **θ_s, θ_r** : déphasage de l'axe direct par rapport au stator et rotor.
- **[P(θ)]** : matrice de transformation de PARK.
- **[P(θ)]⁻¹** : matrice de transformation inverse de PARK.
- **w_s** pulsation statorique.
- **w_r** pulsation rotorique.
- **w** : pulsation mécanique du rotor.
- **P** : nombre de paire de pôles
- **C_{em}** : couple électromécanique.
- **C_r** : couple résistant.
- **Ω** : Vitesse angulaire de rotation.
- **K_f** : coefficient de frottement.
- **J** : Moment d'inertie de la partie tournante de la machine.
- **N_r** : les fuites magnétiques.
- **g** : glissement.
- **AG** : algorithme génétique.

Liste des figures

Figure 1.1 : Vue éclaté d'une MAS triphasé à rotor en court-circuit.....	04
Figure 1.2 : Stator.....	05
Figure 1.3 : Rotor bobiné.....	05
Figure 1.4 : Rotor à cage d'écureuil.....	06
Figure 1.5 : Plaque signalétique du moteur.....	06
Figure 1.6 : Plaque à bornes.....	07
Figure 1.7 : le couplage triangle.....	08
Figure 1.8 : le couplage étoile.....	08
Figure 1.9 : Modélisation de la machine asynchrone.....	09
Figure 1.10 : repérage angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.....	10
Figure 1.11 : schéma électrique de la MAS.....	11
Figure 1.12 : Systèmes d'axes diphasés (d,q).....	13
Figure 2.1 : Schéma équivalent de la machine asynchrone en régime permanent.....	18
Figure 2.2 : Montage étoile neutre non accessible.....	20
Figure 2.3 : Le modèle de la machine asynchrone à vide.....	22
Figure 2.4 : Montage de l'essai à vide.....	22
Figure 2.5 : Analyseur CHAUVIN CA 8332.....	23
Figure 2.6 : graphe des puissances.....	26
Figure 2.7 : Le montage de mesure.	28
Figure 2.8 : Essai avec rotor bloqué.....	29
Figure 2.9 : La carte dSPACE.....	30
Figure 2.10 : le module de dSPACE.....	31
Figure 2.11 : DS1104 Real Time Library.....	32
Figure 2.12 : Codeur incrémental GI355.....	33
Figure 2.13 : Montage moteur avec codeur incrémental.....	34

Figure 2.14 : l'essai de ralentissement.....	35
Figure 2.15 : comparaison entre le courant <i>I_{as}</i> simulé et mesuré.	38
Figure 3.1 : Organigramme général d'un algorithme génétique	41
Figure 3.2 : les niveaux d'organisation d'un algorithme génétique.....	43
Figure 3.3 : Représentation d'un chromosome codé en binaire.....	43
Figure 3.4 : Représentation d'un chromosome codé par PVE.....	43
Figure 3.5 : Représentation d'un chromosome codé par valeurs.....	43
Figure 3.6 : Répartition des probabilités de sélection des individus sur la roulette Wheel.....	46
Figure 3.7 : Croisements en un point.....	47
Figure 3.8 : Croisement en deux points	47
Figure 3.9 : Croisement uniforme.....	47
Figure 3.10 : mutation de deux bits.....	49
Figure 4.1 : Principe d'identification par modèle de référence.....	51
Figure 4.2 : le schéma bloc Simulink pour mesurer la vitesse.	53
Figure 4.3 : représente le schéma bloc Simulink pour mesurer les tensions.	53
Figure 4.4 : le schéma bloc Simulink pour mesurer les courants.	54
Figure 4.5 : Interface du logiciel Control Desk.....	54
Figure 4.6 : superposition des deux courants : mesuré et simulé de la machine asynchrone.....	56

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Mesure statique de R_s sans alimentation.	20
Tableau 2.2 : Mesure statique de R_s avec alimentation.....	21
Tableau 2.3 : essai à vide sous tension variable.	25
Tableau 2.4 : essai à rotor bloqué.....	28
Tableau 2.5 : les paramètres identifiés.....	37
Tableau 3.1 : Analogie entre le modèle biologique et le modèle d'optimisation.....	40
Tableau 4.1 : les paramètres obtenus par l'algorithme génétique.	57