



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : électrotechnique
Option : commande électrique

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

Estimation de la vitesse d'un moteur asynchrone à cage par la méthode de prony en utilisant multi-filtres

Présenté par :
GHEITHAN Basil
Soutenu le : 04 Juin 2017

Devant le jury compose de :
Mr YAHIA KHaled
Mr SAHRAOUI Muhamed
Mr MENACER Arezki

Maître de conférences A
Maître de conférences A
Professeur

Président
Encadreur
Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : électrotechnique
Option : Commande électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Estimation de la vitesse d'un moteur asynchrone à cage par la méthode de prony en utilisant multi-filtres

Présenté par :

GHEITHAN Basil

Avis favorable de l'encadreur :

Mr SAHRAOUI Muhamed *Signature*

Avis favorable du Président du Jury

Mr YAHIA KHaled

Signature

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : électrotechnique
Option : Commande électrique

Thème :

Estimation de la vitesse d'un moteur asynchrone à cage par la méthode de prony en utilisant multi-filtres

Proposé et Dirigé par : Mr SAHRAOUI Muhamed

لعمرك

بسم الله الرحمن الرحيم

(وقل إعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون)

صدق الله العظيم

إلهي لا يطيب الليل إلا بذكرك ولا يطيب النهار
إلا بطاعتك ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك ولا تطيب
الجنة إلا برؤيتك جل

جلالك

الى من بلغ الرسالة وأدى الأمانة ونصح الأمة
العالمين سيدنا محمد... إلى نبي الرحمة و نور

ﷺ

إلى وطني الغالي فلسطين والى أحب بقاع
الأرض إلى قلبنا القدس

إلى أرواح شهدائنا الأبطال... إلى أسرانا
البواسل الذين يخوضون معركة الأمعاء الخاوية
القامعين خلف قضبان الاحتلال

في مثل هذه اللحظات يتوقف الإنسان ليفكر قبل
أن يخط الحروف ليجمعها في كلمات وأي كلمات
هذه التي يستطيع أن يشكر بها هذا البلد
العظيم فالى بلد الشهداء الأبطال... إلى وطني
الثاني... إلى الجزائر... إلى بلد المليون
ونصف المليون شهيد... إلى هذا الوطن الذي لا
تفيه كلمات الشكر والعرفان الجميل... إلى شعب

الجزائر ... هذا الشعب الطيب...
المعطاء... صاحب النخوة والشهامة
إلى من علموني كيف يحيا الإنسان بعزة
وكرامة...

إلى من كلفه الله بالهبة والوقار.... إلى من
علمني العطاء بدون انتظار.... إلى من أحمل
اسمه بكل افتخار.... أرجو من الله أن يمد في
عمرك لتري ثمارا قد حان قطافها بعد طول
انتظار.... وستبقى كلماتك نجوم اهتدى بها
اليوم وفي الغد والى الأبد.... والدي
العزيز....

إلى ملاكي في الحياة.... إلى معنى الحب
والحنان.... إلى بسمة الحياة..... إلى من
كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى
أغلى الحبايب أمي الحبيبة حفظها الله ورعاها
وأدام الله في عمرها

وأهدي هذا العمل المتواضع إلى روح جدتي
الطاهرة صفية عليان رحمة الله عليها...سلاماً على
روحك الطاهرة كم اشتاق لكي.... يا رب أن
جدتي بقربك وبجوارك اللهم اغفر لها بقدر حبنا
واشتياقنا لها واجعلها ممن يفوزون برضاك
وجنتك

إلى أرواح أجدادي من أحمل اسمهم بكل فخر "حسن
أبو احمد" و "حسن أبو العبد"

رحمهم الله

إلى جمال أيامنا التي نبض ماضيها إلى معنى
الأرض والام والوطن

جدتي الحبيبة رحمها الله حسنيه بدران

إلى زهرة النرجس التي تفيض عطرا , طهارة , حبا ,
ونقاء... روعي وقلبي إلى أعز ما املك... إلى
زهرة قلبي ونور دربي إلى اصدق القلوب في حبي
إلى من هي اعز من نفسي على نفسي إلى منفي
رؤيتها حياتي وبعدها شوقي وقربها سعادتي
أختي الحبيبة "م. بيسان"

إلى قوتي وملادي بعد الله عز وجل... إلى من
آثروني على أنفسهم... إلى ينبوع الصبر
والتفاؤل والأمل والتضحية... إلى القلوب
الطاهرة والنفوس الزكية... إلى الرجال...
إلى رياحين حياتي... إلى سندي في الحياة...
ومصدر قوتي... إلى من معهم يكتمل
كياني...

إلى أوفى الخلق في حياتي... إلى من فراقهم
أدمى فؤادي

إخواني "د.حازم , د. تامر , م.مجد , محمد"

إلى من هم أقرب إلي من روحنا... إلى من كللهم
الله بالهيبة والوقار... إلى من علموني كيف
يكون العطاء بدون انتظار... إلى من تحملوا
الكثير من أجلنا... إلى الأيادي الطاهرة التي
أزالت من أمامنا أشواك الطريق ورسمت لنا
المستقبل بخيوط من الأمل والثقة إلى قدوتنا
ومثلنا الأعلى... أعمامي و أبنائهم... إلى
أخوالي و أبنائهم... حفظهم الله عزوجل
إلى من يسكن حبهن قلبي... و تشتاق عيني
إليهن... إلى خالاتي و عماتي الغاليات
وأبنائهن حفظهن الله عزوجل

إلى زملائي وزميلاتي في التخصص كل باسمه ولقبه
وأخص بالذكر أكرم بن فرحات

وأهله الكرام

إلى معنى الاخوة....والصحبة الصادقة... تقي

الدين عزوز

إلى صاحب القلب الطيب والنفس الطاهرة...خالد

العجال

إلى أصدقاء غربتي الذين سبقوني على طريق

العلم والنجاح ... إلى الذين كنت أرى الدنيا

جميلة بعيونهم... إلى الذين جعلوا من مرارة

غربتي ذكريات جميلة احلم أن تعود يوما من

الأيام ... إلى كل من فارقوني وبقيت ذكراهم

عامرة في قلبي... إلى من كانوا برفقتي

وساندوني..... إلى كل أصدقائي في الغربة

إلى من اخط و إياهم كلمات النهاية في حياتي

الجامعية...

" مُجَّد قديمات, قصي عليان, مُجَّد جردات, عدي جردات,

أسامة حسن, عقلة الضابط, أبو مخو, سيف,

حجازي, مؤمن, قصي, فراس, خليل, ابو فلاح

, عزوني, فادي, باهي, أنس, روعي, أبو عرقوب,

مؤمن, منذر, ملالحة, العناتي, عبد الرحمن,

خطاب, هشام, باهي, فادي, النجار,

حامد, غسان, عابدين, مُجَّد البريم, قصي حروب,

عيايدة, رزق, حسين شراب, كيالي, شواف, صبيح,

أبو امونة, رافد

الى من حملونا مشعل العلم واسم الوطن
.... وحملونا أمانة الوفاء

"م.صلاح حنني, م.عوض المصري, م.كرم بكر,
م.مريد, م.مُجد الزيتونية, م.ماجد, م.أسامة عرفات,
م.عيسى, م.بهاء, م.نضال "

إلى إخواني وأصدقائي الأوفياء في ولاية مستغانم
"م.مُجد أبو علان, مُجد قرب, أدهم القسيس, عاصم
حلواني, يزن, أبو ياسين, أسيد عمر, سحويل
, إبراهيم, مُجد مشني, احمد بعلوشه وأهله الكرام"
إلى أخ الوطن ورفيق الغربة.... إلى من جمعني
به الغربة وحوانا الوطن

الغالي"أبو فلسطين" والأخ "حمزة سلمة"
و إلى كل الطلبة الفلسطينيين في ولاية بسكرة
خاصة والجزائر عامة والى من لم يذكرهم قلبي
ولم ينسأهم قلبي
إليكم جميعا أهدي بحثي المتواضع هذا وأتمنى
من الله عز وجل أن ينال إعجابكم و الله ولي التوفيق
باسل غيظان



الشكر

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم "من لا يشكر الناس لا يشكر الله عز وجل".
الحمد لله الذي أنار لنا درب العلم والمعرفة وأعاننا على أداء هذا الواجب ووفقني إلى
إنجاز هذا العمل.... أتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى كل من ساعدني من قريب أو
من بعيد على إنجاز هذا العمل إلى الذين بذلوا كل جهد وعطاء لكي أصل إلى هذه
اللحظة أساتذتي الكرام وأخص بالذكر أستاذي الفاضل صحراوي محمد الذي شرفني
بإشرافه على بحثي هذا ، أستاذي الفاضل لك مني عظيم الامتنان والعرفان على ما
بذلته من أجلنا وعلى صبرك وتحملك معنا طوال فترة إنجاز هذا العمل والذي كان
عوناً لي في اتمام هذا المشروع وكان لي خير سند ولم يبخل علي بتوجيهاته
ونصائحه القيمة....

وأقدم بجزيل الشكر وعظيم الامتنان إلى اللجنة الكريمة :

الأستاذ خالد يحيى لقبوله رئيس لجنة التحكيم

والأستاذ ارزقي مناصر لقبوله مناقش في لجنة التحكيم

والشكر والتقدير موصول إلى جميع أعضاء الهيئة التدريسية والادراية في

جامعة محمد خيضر بسكرة

فبارك الله فيكم وجزاكم خير الجزاء

ودمتم ذخراً لمسيرة العلم



Liste des tableaux

Chapitre I : L'état de l'art.

Chapitre II : étude et application de la méthode de Prony

Tab. II.1 : Les harmoniques du courant statorique..... 13

Tab. II.2 : L'amplitude et fréquence par la méthode de prony et FFT..... 24

Tab. II.3 : fréquence de coupure pour les trois filtres passe-bande..... 36

Tab. II.4 : Les valeurs exactes de fréquence et de la vitesse du moteur 3KW
pour différentes charges..... 36

Tab. II.5 : La vitesse réelle et la vitesse estimée par la méthode PFG et l'erreur
d'estimation pour différentes charges..... 39

Chapitre III : étude expérimental pour l'estimation de la vitesse

Tab.III.1 : Les Caractéristiques de la machine utilisée..... 46

Tab.III.2 : Comparaisons entre la vitesse estimée et la vitesse mesurée..... 48

Chapitre I : L'état de l'art

Fig. I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.	3
Fig. I.2 : Vue schématique en perspective du stator à 4 pôles (circuit magnétique, conducteurs actifs, tête de bobines).....	4
Fig. I.3 : Photo du stator d'une machine asynchrone.....	5
Fig.I.4 : Rotor bobiné d'une machine asynchrone.....	5
Fig. I.5 : Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit.....	6
Fig. I.6 : Rotor à cage d'une machine asynchrone.....	7
Fig. I.7 : Photo réelle d'un moteur asynchrone.....	7
Fig. I.8. : Approches existantes pour l'estimation de la vitesse.....	9
Chapitre II : Etude et application de la méthode de PRONY	
Fig. II.1 : Spectre du courant I_a à l'état sain en 100% de la charge nominale, avec les quatre familles des harmoniques (a. TH, b. RSH, c. EFH, d. RBFH).....	15
Fig. II.2 : Présence des harmoniques RSH.....	17
Fig. II.3 : Effet de la charge sur les RSH pour la marge fréquentielle 0-170H...	17
Fig. II.4 : Effet de la charge sur les RSH pour la marge fréquentielle 470-870HZ.....	18
Fig. II.5 : Spectre de courant statorique pour différentes conditions de charge mécanique.....	20
Fig. II.6 : Principe général de l'algorithme d'estimation de la vitesse par la méthode de prony.....	23
Fig.II.7 :Signal généré monocomposante.....	24
Fig.II.8 :Le spectre du signal généré monocomposante.....	24
Fig. II.9 : Méthode de prony à fenêtre glissante.....	25
Fig.II.10 : Fréquence et Amplitude estimée par la méthode de PFG.....	26
Fig. II.11 : L'allure temporelle du signal génère non-stationnaire.....	27
Fig. II.12 : Fréquence et l'amplitude estimée d'un signal non-stationnaire.....	27
Fig. II.13 : L'allure temporelle du signal génère multi-harmonique.....	28
Fig. II.14 :Spectre du signal généré de trois composantes.....	28
Fig. II.15 : Fréquence et l'amplitude estimée d'un signal compliqué par la méthode de PFG.....	28
Fig. II.16 : Les allures temporelles du signal avec SNR=50.....	30

Fig. II.17 : Fréquence et Amplitude estimées d'un signal générique à trois composants avec valeur de SNR=50.....	30
Fig. II.18 : Erreur d'estimation (%) de fréquence et amplitude avec SNR=50....	31
Fig. II.19 : Les allures temporelles du signal avec SNR=10.....	31
Fig. II.20 : Fréquence et Amplitude estimées d'un signal générique à trois composants avec valeur de SNR=10.....	32
Fig. II.21 : Erreur d'estimation (%) de fréquence et amplitude avec SNR=10....	32
Fig. II.22 : Illustration de l'opération de recherche de f_{PSH}	33
Fig. II.23 : Spectre du courant statorique expérimentale pour déférant charge...	34
Fig.II.24 : L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone à 0% de la charge et à l'état sain.....	34
Fig.II.25: Conception du filtre passe-band.....	35
Fig. II.26 : La fréquence du premier PSH estimée par la méthode PFG pour différents charge mécanique.....	37
Fig. II.27 : La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à vide.....	38
Fig. II.28 : La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à 20% de la charge nominale.....	38
Fig. II.29: La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à 60% de la charge nominale.....	39
Fig. II.30 : La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à 100% de la charge nominale.....	39
Fig. II.31 : La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à 20% puis 100% et 60% de la charge nominale.....	40
Chapitre III : étude expérimental pour l'estimation de la vitesse	
Fig.III.1 : Banc d'essais expérimental pour l'estimation de la vitesse.....	43
Fig.III.2 : Description des matériels utilisés pour l'acquisition du signal.....	44
Fig.III.3 : Description des matériels utilisés pour l'acquisition du signal.....	45
Fig.III.4 : L'évolution temporelle du courant de la phase a avec différentes charges.....	47
Fig. III.5 : Estimation en ligne de la vitesse durant des changements brusques dans la charge.....	49

Résumé :

Il est bien connu que l'estimation de la vitesse du rotor revêt une importance primordiale pour le bon diagnostic des moteurs asynchrone. Dans ce mémoire de fin d'études, une nouvelle technique pour l'estimation de la vitesse du rotor en utilisant la méthode de Prony a été proposée. L'algorithme développé à cet effet, est basé sur le suivi des fréquences des harmoniques d'encoches rotorique (RSH) qui existent dans les courants de stator de la plupart des moteurs à induction à cage d'écureuil. D'autre part, les harmoniques RSH sont utilisés afin d'éviter l'effet possible des harmoniques provenant d'autres sources. La méthode de Prony proposée montre une grande efficacité pour le suivi des fréquences RSH et puis la vitesse de rotation. En outre, cette technique permet de traiter les signaux bruités et non stationnaires et elle ne nécessite que quelques échantillons de données, ce qui réduit considérablement les exigences de temps et de stockage de données. Par conséquent, l'algorithme proposé est adapté à la mise en œuvre en ligne. La technique proposée permet d'estimer la vitesse de l'instigatrice avec une très grande précision et L'efficacité de la méthode été testés par des essais de simulation et des tests expérimentaux.

Mots clés : Filtration, Machine asynchrone (MAS), analyse spectrale, méthode de PRONY, estimation de la vitesse.

ملخص:

من المعروف أن تقدير سرعة المتحرض أو الجزء الدوار في المحركات الكهربائية غير المتزامنة، له أهمية قصوى بالنسبة للتشخيص السليم لأعطاب هذه المحركات. في عملنا هذا، نقوم بدراسة تقنية جديدة لتقدير سرعة الجزء الدوار باستخدام طريقة برونّي (Prony) لإنشاء خوارزمية وضعت لهذا الغرض، حيث أنها تقوم بتتبع ترددات توافقيات فتحات الدوار (RSH) التي توجد في تيارات الجزء الثابت من معظم المحركات الحثية (غير المتزامنة) من نوع قفص السنجاب، وعلاوة على ذلك، يتم استخدام التوافقيات (RSH) لتجنب التأثير المحتمل للتوافقيات من مصادر أخرى. طريقة برونّي المقترحة تظهر قدرة كبيرة على تتبع ترددات RSH ومن ثم سرعة الدوران. و علاوة على ذلك، هذه الطريقة تسمح بمعالجة إشارات مشوشة وغير ثابتة التردد من خلال عدد قليل من العينات المأخوذة من هذه الأخيرة وذلك للحد بشكل كبير من متطلبات الوقت وتخزين البيانات في الكمبيوتر. حيث أن الخوارزمية المقترحة هي مناسبة للتنفيذ في الزمن الحقيقي. توفر التقنية المقترحة تقدير سرعة المحرض مع دقة عالية جدا ويمكن التحكم في الكفاءة العملية لهذه الطريقة عن طريق المحاكاة والاختبارات التجريبية.

الكلمات المفتاحية : التصفية، الآلة الغير متزامنة، التحليل الطيفي، طريقة برونّي، تقدير السرعة.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : L'état d l'art	
I.1 INTRODUCTION	3
I.2. CONSTITUTION DE LA MACHINE ELECTRIQUE	3
I.2.1. Stator.....	4
I.2.2. Rotor.....	5
I.2.2.1. Rotor bobiné.....	5
I.2.2.2. Rotor à cage d'écureuil.....	6
I.2.3. Les organes mécaniques.....	7
I.3. LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR ASYNCHRONE	8
I.3.1. Définition du glissement.....	8
I.4. LES DEFFERANTES APPROCHES D'ESTIMATION DE LA VITESSE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE	9
I.4.1. Approche directe à base d'un capteur.....	9
I.4.2. Approche modèle.....	10
I.4.3. Approche signal.....	10
I.5. CONCLUSION	11
Chapitre II : Etude et application de la méthode de Prony	
II.1. INTRODUCTION	12
II.2. LA TRANSFORMIER DE FOURIER RAPIDE	12
II.3.Applications de la FFT sur les courants statoriques	13
II.4. RELATION ENTRE LES (RSH, EFH, RBFH) ET LA VITESSE DE ROTATION	15
II.5.PRESENTATION DES RSH DANS LA BANDE FREQUENTIELLE..	16
II.5.1. Effet de la charge sur les RSH	17
II.6. Définition des (PSH)	19
II.6.1. Effet de la charge sur les PSH.....	19
II.7.LA METHODE DE PRONY	20
II.8.La METHODE DE PRONY MODIFIER	22
II.9. APPLICATION DE LA METHODE DE PRONY	23
II.9.1. Algorithme de Prony à fenêtre glissante(PFG).....	25

II.9.2. Application sur un signal généré mono-composante.....	25
II.9.3. Application sur un signal généré mono-composante non-stationnaire.....	26
II.9.4. Application sur un signal généré multi-composantes.....	27
II.10. EFFET DU BRUIT SUR LES RESULTATS.....	29
II.11. DETERMINATION DE L'INTERVALLE DE PREMIER PSH.....	33
II.12. APPLICATION SUR DESSIGNAUX EXPERIMENTAUX.....	34
II.12.1. Traitement préliminaire.....	34
II.12.1.1. L'acquisition des données.....	34
II.12.1.2. Filtrage.....	35
II.13. LES RESULTATS D'ESTIMATION.....	36
II.13.1. Estimation de la fréquence et l'amplitude de PSH.....	37
II.14. LES RESULTATS D'ESTIMATION DE LA VITESSE.....	38
II.14.1. Estimation de la vitesse pour un fonctionnement non-stationnaire.....	40
II.15. CONCLUSION.....	41
CHAPITRE.III: ETUDE EXPERIMENTAL POUR L'ESTIMATION DE LA VITESSE	
III.1. INTRODUCTION.....	42
III.2. DEFINITION.....	42
III.3. DESCRIPTION DE BANC D'ESSAI.....	46
III.4 RESULTATS EXPERIMENTAUX	48
III.5. CONCLUSION.....	50
CONCLUSION GENERALE.....	51
Bibliographie.....	52

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

La machine asynchrone joue un rôle primordial dans l'industrie. Elle est la plus demandée dans le domaine de la conversion électromécanique d'énergie à cause de ses qualités de robustesse et de sa simplicité et de son faible coût. De plus, grâce au développement de l'électronique de puissance et les dispositifs des commandes en temps réel, la machine a supplanté les autres machines dans la majorité des applications à vitesse variable.

Notons aussi que les progrès réalisés en matière de contrôle dans le domaine de l'électronique de puissance ou de la microélectronique, ont rendu possible l'implantation de commandes performantes pour cette machine, faisant d'elle un concurrent certain dans les secteurs de la vitesse variable et du contrôle rapide de couple, détrônant ainsi le moteur à courant continu.

Jusqu'à présent, la détection de la vitesse du moteur sans capteurs est encore un sujet de recherche ouvert. En effet, l'estimation de la vitesse du rotor a une importance cruciale pour une grande variété d'applications électriques, y compris la surveillance de l'état de machine et les applications de commande du moteur.

Il est bien connu que l'estimation de la vitesse du rotor revêt une importance primordiale pour le bon diagnostic des roulements, des excentricités d'entrefer ou défauts de barres de rotor. Dans cette mémoire, une technique d'estimation de la vitesse du rotor en utilisant les techniques de traitement du signal pour exploiter les saillances de machines existantes. Les saillances peuvent être générées à cause des variations de la réluctance rotorique ou en raison de la saturation magnétique. En ce qui concerne les moteurs asynchrones à cage d'écureuil, les saillances existent en raison des encoches rotoriques. Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH) sont généralement utilisées, d'une part, pour la détection de défaut dans les moteurs à induction ; et d'autre part, certaines études ont utilisés les RSH pour l'estimation de la vitesse, puisque leurs fréquences sont naturellement liées à la vitesse rotorique. L'efficacité des méthodes de mesure de la vitesse par cette approche dépend fortement du type de technique de traitement de signal utilisé. L'attention principale doit être axée sur les performances de la méthode utilisée vis-à-vis les signaux non stationnaires.

Dans notre étude on a proposé d'utilisé la méthode de prony qui permet d'estimer et suivre les fréquences et les amplitudes correspondantes de n'importe quel harmonique. L'objectif de ce travail consiste à développer un algorithme, basé sur la méthode de Prony,

qui permet d'estimer et de suivre la fréquence du premier PSH et par conséquent d'extraire la vitesse de rotation.

Plan de mémoire

Le premier chapitre est consacré à la présentation générale de la machine asynchrone. Il décrit la constitution et le principe de fonctionnement de cette machine, aussi la disposition des diverses approches d'estimation de la vitesse rotorique en se concentrant sur l'approche signal.

Le second chapitre est consacré l'analyse spectrale du courant statorique d'un moteur asynchrone à cage, ceci va nous permettre d'explorer les différentes familles d'harmoniques et de choisir celle qui permet d'estimer la vitesse à partir de la fréquence du premier PSH.

Le dernier chapitre présente l'implantation expérimentale de la technique de **prony** pour l'estimation de la vitesse d'une machine asynchrone à l'état sain pour différentes charges. L'implantation de l'algorithme proposé est effectuée sous l'environnement LabVIEW.

Finalement, nous terminerons cette étude par une conclusion générale et des perspectives qui peuvent être prises dans des travaux futurs.

Chapitre I

État de l'art

I.1. INTRODUCTION

La machine asynchrone occupe un domaine très important dans l'industrie et son utilisation dans la variation de vitesse n'est pas une chose nouvelle. Elle est appréciée pour sa robustesse, son faible coût d'achat et d'entretien, sa puissance massive et sa vitesse maximale supérieure.

Dans ce premier chapitre, nous décrivons la machine asynchrone. Après avoir rappelé brièvement les éléments de constitution de cette machine. Puis on va présenter les diverses approches d'estimation de la vitesse rotorique en se concentrant sur l'approche signal.

I.2.CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE

Les machines asynchrones triphasées peuvent se décomposer, du point de vue mécanique, en trois parties principales distinctes :

- le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.
- le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.
- les organes mécaniques permettant la rotation du rotor et le maintien des différents ensembles.

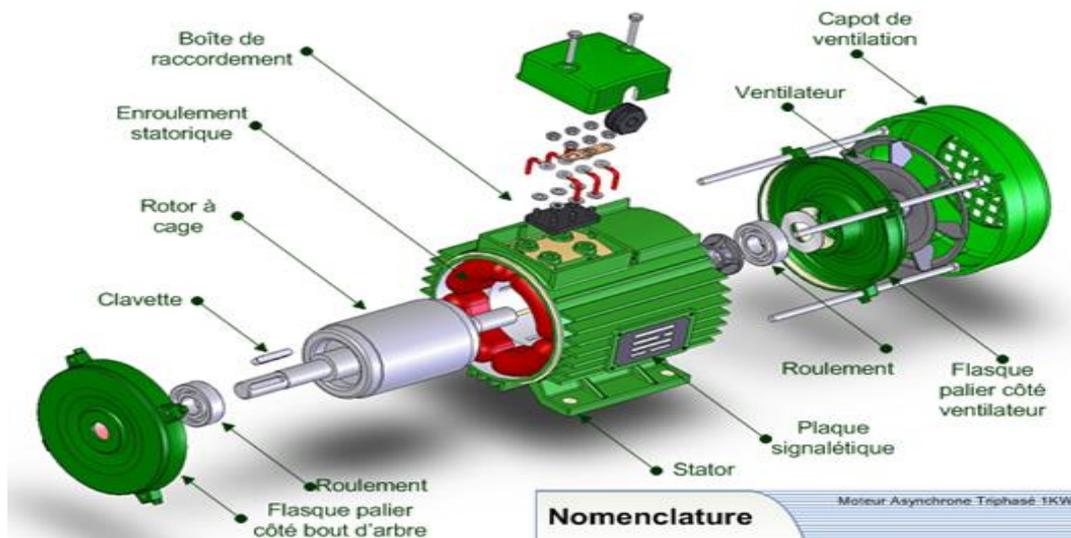


Fig. I.1 : Eléments de constitution d'une machine asynchrone à cage d'écureuil.

I.2.1.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 importantes, 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 est 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. Pour les grosses machines, les enroulements sont faits en cuivre de différentes sections insérés directement dans les encoches [AGR 16].

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. Le stator d'une machine asynchrone est aussi pourvu d'une boîte à bornes à laquelle est reliée l'alimentation électrique. Nous représentons sur la FigI.2 les différentes parties de constitution du stator d'une machine asynchrone [DID04].

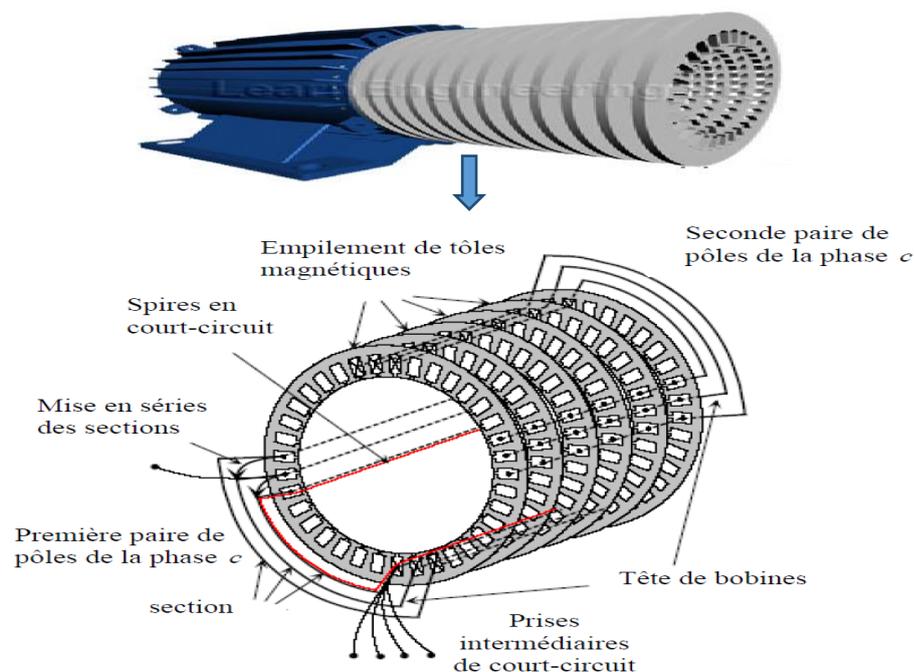


Fig. I.2 : Vue schématique en perspective du stator à 4 pôles (circuit magnétique, conducteurs actifs, tête de bobines).

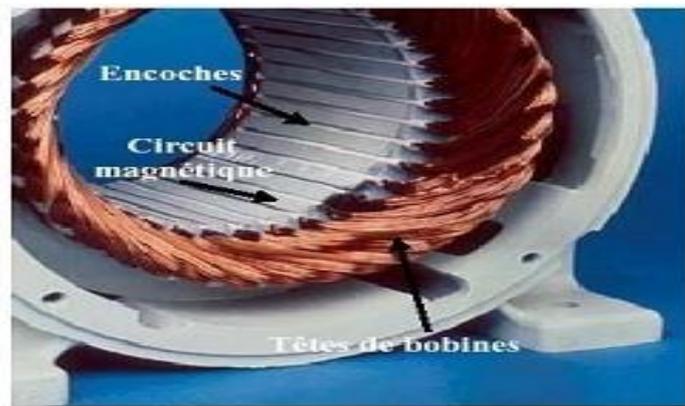


Fig. I.3. Photo du stator d'une machine asynchrone.

I.2.2. Rotor

Le rotor, monté sur l'arbre, se compose d'un cylindre fait de tôles empilées. Des encoches sont percées à la périphérie extérieure destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement. Il existe deux types de rotor : Le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné [OND 06].

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 de machines asynchrones [AGR 16].

I.2.2.1. Rotor bobiné

Les rotors bobinés sont construits de 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 [DID04].



Fig.I.4. Rotor bobiné d'une machine asynchrone.

I.2.2.2 le rotor a cage d'écureuil

Dans le rotor à cage, les anneaux de court-circuit permettent la circulation des courants d'un conducteur d'encoche (barres rotoriques) à l'autre. Ces barres conductrices sont régulièrement réparties, et constituent le circuit du rotor **Figure I.4** et **Figure I.5**. Cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôles empilés sur l'arbre de la machine analogue à celui du moteur à rotor bobiné [DJE07].

Dans le cas de rotors à cage d'écureuil, les conducteurs sont réalisés par coulage d'un alliage d'aluminium, ou par des barres massives de cuivre préformées et frettées dans les tôles du rotor. Il n'y a généralement pas, ou très peu, d'isolation entre les barres rotoriques et les tôles magnétiques, mais leur résistance est suffisamment faible pour que les courants de fuite dans les tôles soient négligeables, sauf lorsqu'il y a une rupture de barre.

Le moteur à cage d'écureuil est beaucoup plus simple à construire que le moteur à rotor bobiné et, de ce fait, son prix de revient est inférieur. De plus, il dispose d'une plus grande robustesse. Il constitue la plus grande partie du parc de moteurs asynchrones actuellement en service.

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

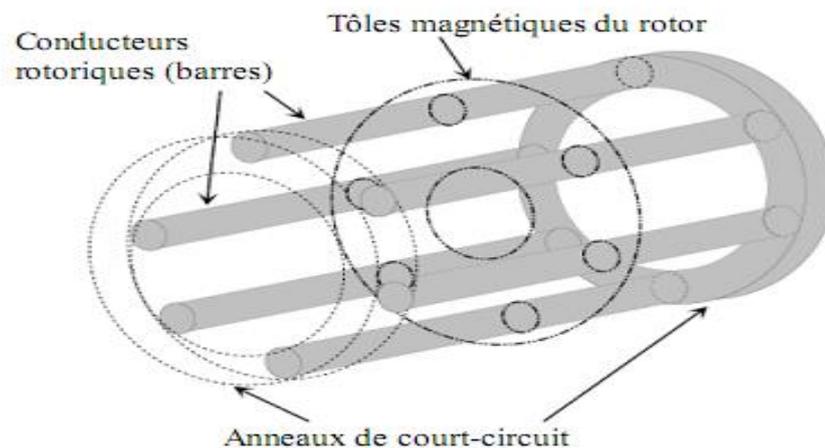


Figure. I.5. Vue schématique en perspective du rotor (tôles magnétiques, conductrices d'encoches (barres) et anneaux de court-circuit.

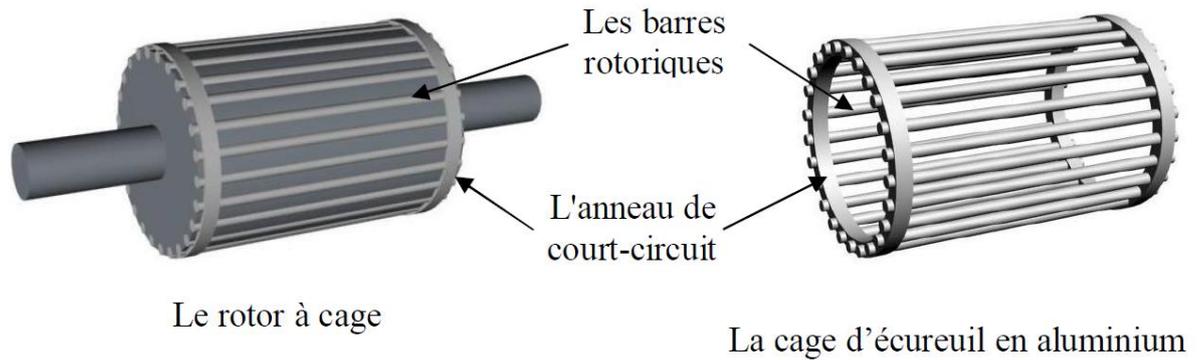


Fig. I.6: Rotor à cage d'une machine asynchrone.



Fig. I.7 : Photo réelle d'un moteur asynchrone.

I.2.3. Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor et un bout d'arbre sur lequel est fixé un demi-accouplement. Il est généralement constitué en acier moulé ou forgé. Son dimensionnement est fonction des efforts de flexion (force centrifuge qui s'exerce sur lui, attraction magnétique radiale, etc...), des efforts radiaux et tangentiels dus aux forces centrifuges, des efforts de torsion (couple électromagnétique transmis en régime permanent, transitoire). Il est supporté par un ou plusieurs paliers [ABL09]. Ces paliers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux

dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements pour les machines de petite et moyenne puissance.

I.3.LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU MOTEUR ASYNCHRONE

Dans une machine asynchrone triphasé, Il y a Trois bobines identiques placées à 120° (décalage spatiale de 120° entre eux) sur le stator et alimentées par une tension alternative créent trois champs alternatifs qui, lorsqu'ils sont composés, forment un champ tournant à la vitesse $\Omega = \frac{\omega}{p}$ rd/s. Ce champ tournant peut entraîner en rotation une aiguille aimantée.

Les conducteurs du rotor, balayés par le champ tournant d'entrefer, sont le siège de f.é.m. induites. Le rotor étant en court-circuit, ces f.é.m. produisent des courants induits [AGR 16]. Ces courants placés dans le champ tournant sont soumis à des forces électromagnétiques. Ces forces produisent un couple qui fait tourner le rotor. Le sens de rotation est d'après la loi de Lenz, la rotation s'oppose à cause qui lui donne naissance. Cette cause est le déplacement du champ par rapport aux conducteurs du rotor. Le rotor tourne donc pour rattraper le champ, soit dans le même sens que le champ. Si le rotor tourne à la vitesse de synchronisme, le flux à travers le rotor ne variait pas, d'où plus des courant ni de couple.

ω : La vitesse angulaire de la machine en rd/s.

I.3.1.Définition du glissement

L'écart entre les deux vitesses : La vitesse de synchronisme et la vitesse de rotation

$$g = \frac{\Omega - \Omega_r}{\Omega} \quad (\text{I.1})$$

Tel que

Ω : la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) en rd/s.

Ω_r : la vitesse de rotation en rd/s.

I.4. LES DEFFERANTES APPROCHES D'ESTIMATION DE LA VITESSE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE

On présente dans cette étude une méthode qui permet d'estimer la vitesse mécanique du rotor d'un moteur asynchrone. Pour cela nous allons présenter les méthodes existant pour l'estimation de la vitesse qu'ils peuvent se décomposer en trois approches, dans notre étude en exploitant l'approche III :

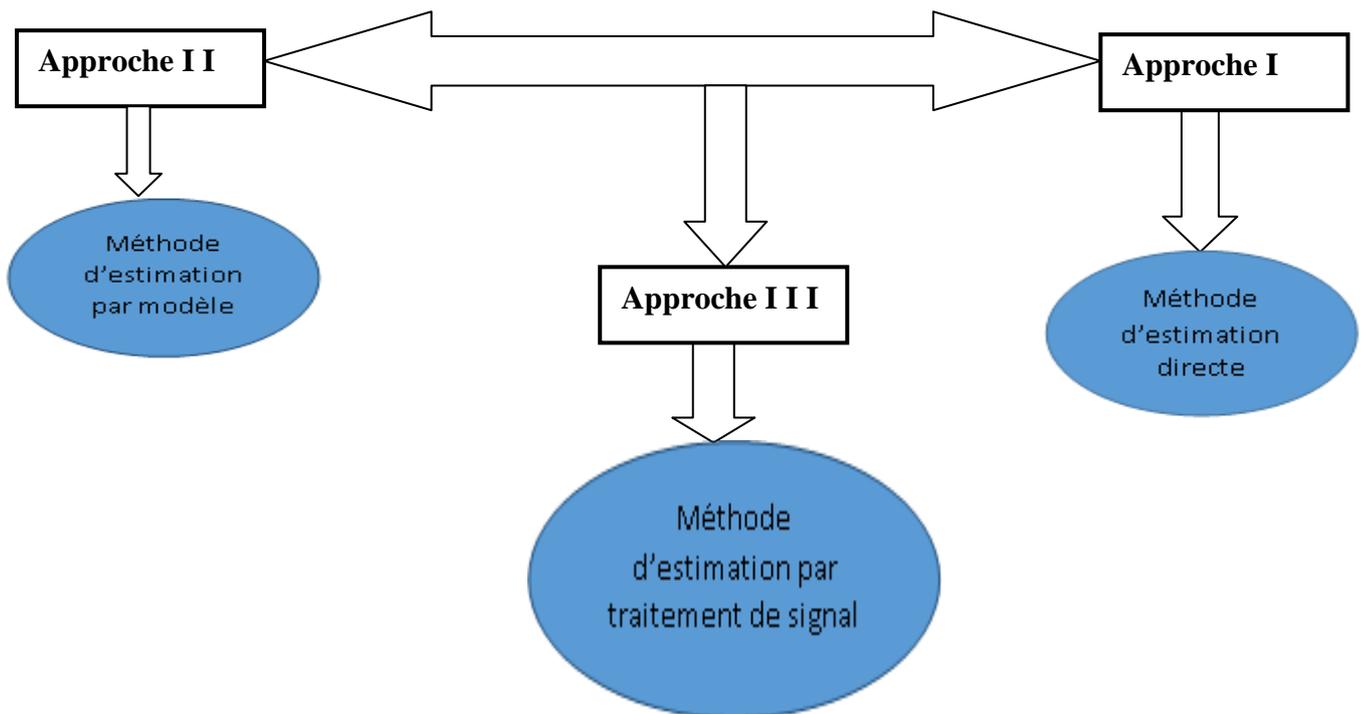


Fig. I.8 : Approches existantes pour l'estimation de la vitesse.

Il existe trois approches permettant d'estimer la vitesse de rotation dans les machines asynchrones.

I.4.1. Approche directe à base d'un capteur

Dans cette approche, l'information de la vitesse de rotation est obtenue directement par l'utilisation des capteurs de vitesse. Ceci peut être fait par les résolveurs, génératrice tachymétriques encodeurs numériques...etc. Cependant, cette approche présente de nombreux inconvénients.

En effet, le montage d'un capteur de vitesse peut être considéré comme un facteur de coût supplémentaire qui doit considérablement la robustesse et la simplicité des moteurs à induction. En outre, pour les machines de faible puissance, le coût du capteur devient

comparable avec le coût du moteur lui-même [AGR 16]. Ce qui justifie l'importance des méthodes d'estimation de la vitesse sans capteur pour les applications de faible puissance

I.4.2.Approche modèle

La deuxième approche peut être utilisée pour estimer la vitesse d'un moteur asynchrone à partir des modèles mathématiques de la machine asynchrone en utilisant des structures adaptatives pour les paramètres de ces modèles.

L'estimation de la vitesse rotorique par cette approche nécessite la mesure des courants et des tensions statoriques comme pour les systèmes de modèle de référence adaptatif (MRAS). On peut utiliser aussi les observateurs d'état déterministes (Luenberger) et stochastiques (filtre de Kalman étendue EKF)[KSZ08], observateur Adaptatif de flux [JMA00]...Ces méthodes donnent de bonnes performances mais elles présentent l'inconvénient de leurs dépendances aux variations des paramètres de la machine. Cela affecte directement la précision de l'estimation de la vitesse rotorique.

I.4.3.Approche signal

La troisième approche de l'estimation de vitesse utilise les méthodes de traitement de signal pour exploiter les saillances naturelles de la machines. En ce qui concerne les moteurs à induction à cage d'écureuil, les saillances existent en raison des encoches rotoriques. Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH) [OKE13], sont généralement utilisés pour la détection des défauts dans les moteurs asynchrones. En revanche, certains travaux ont utilisés les RSH pour l'estimation de la vitesse rotoriques dans les moteurs à induction [MAI05], car leurs fréquences sont liées à la vitesse du moteur. Les performances de ces méthodes dépendent fortement du type de la technique d'analyse spectrale appliquée. L'attention principale doit être axée sur l'efficacité de la méthode pour les signaux non-stationnaires.

Dans ce contexte, différentes techniques ont été présentées dans la littérature : Prony, FFT, Ondelette, Hilbert,....

Dans ce travail, Nous allons utiliser la méthode de prony pour analyser le courant statorique et par conséquent on va estimer la fréquence de l'harmonique RSH par laquelle on peut extraire la vitesse de rotation.

I.5.CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté de manière générale la constitution de la Machine asynchrone en citant en premier temps les différentes parties qui la composent, tel que : le bobinage Statorique et rotorique et les différents organes mécaniques de la machine ainsi que le principe de fonctionnement de cette dernière.

Ensuite, nous avons exploré les différentes techniques approche d'estimation de la vitesse d'un moteur asynchrone.

On se que concerne sur celles appartenant à l'approche signal (Analyse Spectrale du Courant Statorique) à l'utilisation de la méthode de prony. Le chapitre suivant sera consacré à citer les différentes familles des harmonique existent dans le signal du courant d'une phase statorique seul de définir la méthode de prony.

Chapitre II

Etude et application de la méthode de Prony

II.1. INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu précédemment, plusieurs phénomènes entrent en jeu pendant le fonctionnement du moteur asynchrone à cage et affectent essentiellement les courants d'alimentation en modifiant leurs formes.

Puisque les allures temporelles ne donnent pas beaucoup d'informations, on était obligé d'aller vers les méthodes de traitement de signal. Plusieurs techniques de traitement de signal ont été utilisées depuis longtemps pour analyser le contenu spectral des différents signaux issus des machines électriques tels que : le couple, la vitesse, les courants, le flux, les vibrations...etc.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'utilisation de la méthode de **Prony**, qui permet d'estimer toutes les caractéristiques d'harmoniques de n'importe quel signal à partir d'un petit nombre des échantillons. Ceci s'adapte parfaitement à notre application qui vise l'estimation de la vitesse du moteur asynchrone.

II.2. LA TRANSFORMIER DE FOURIER RAPIDE

On rappelle que la transformée de Fourier Rapide $X(f)$ d'un signal continu dans le temps est donnée par :

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{II.1})$$

Cependant, un ordinateur ne peut traiter que des signaux numériques, ceux-ci sont obtenus après un échantillonnage. Dans notre cas, les signaux à analyser sont les courants statoriques acquis ou prélevés à l'aide d'une carte dSpace 1104 en utilisant des capteurs de courant à effet Hall. L'acquisition a été faite selon les paramètres suivants :

- La fréquence d'échantillonnage : $f_e = 10000 \text{ Hz}$.
- Le temps d'acquisition : $T_a = 10 \text{ sec}$.
- Le nombre des échantillons : $N_e = \frac{T_a}{T_e} = f_e * T_a = 100000 \text{ échantillons}$.
- La résolution fréquentielle : $\Delta f = \frac{1}{T_a} = \frac{1}{10} = 0.1 \text{ Hz}$.

Avec un ordinateur, il est impossible de calculer la FFT $x(f)$ pour une valeur quelconque de la fréquence f . Donc, on ne calcule la FFT que pour des multiples Δf . C'est

la notion de la Transformée de Fourier Discrète (DFT). En conséquence, la DFT $x(n)$ d'un signal échantillonné est donnée par :

$$x(n) = \sum_{k=1}^{N_e} x(k) e^{-j2\pi k \frac{n}{N_e}} \quad \text{avec } n = 1, 2, 3, \dots, N_e. \quad (\text{II.2})$$

Il est important de noter que la résolution fréquentielle joue un rôle primordial quant à la clarté du spectre, elle doit être de faible valeur pour qu'on puisse séparer les harmoniques proches.

II.3. APPLICATIONS DE LA FFT SUR LES COURANTS STATORIQUES

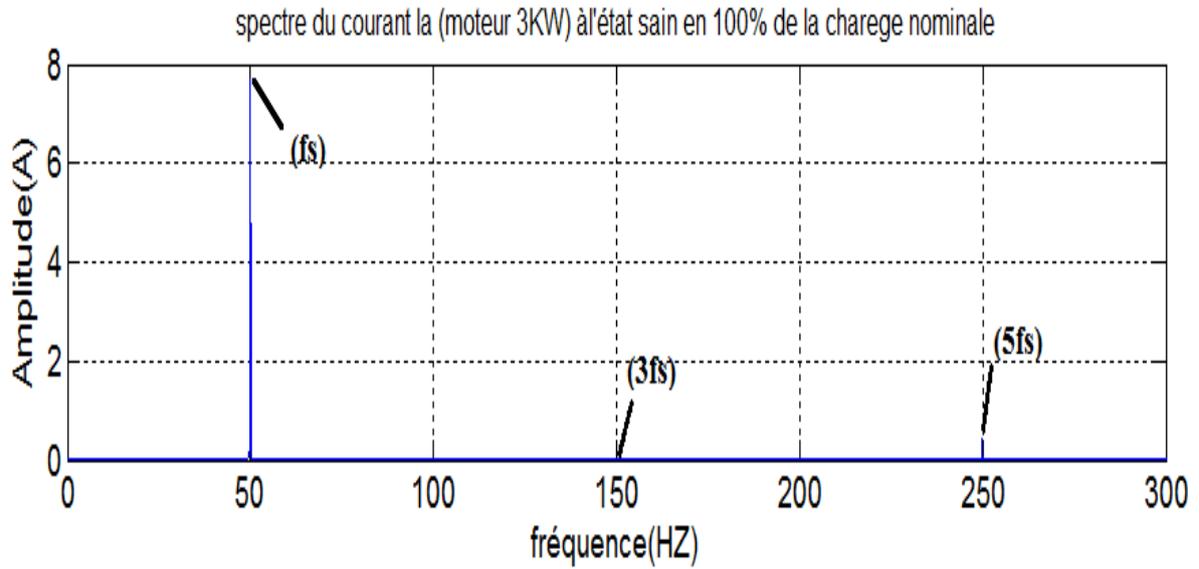
Dans un premier temps et afin d'explorer le contenu spectral des courants statoriques d'un moteur asynchrone, nous allons appliquer la FFT sur des signaux expérimentaux obtenues à partir des essais (sur un moteur de 3kW) réalisés au niveau du laboratoire LGE de Biskra. Les résultats obtenus mettent en évidence la richesse en harmoniques du courant statorique. On peut identifier quatre types d'harmoniques qui sont toujours présents dans le spectre du courant statorique même à l'état sain [AGR 16] :

Les différents harmoniques	Les formules globales	Les causes principales
Les harmoniques du temps (TH)	$TH = \nu \cdot f_s$	Ce type d'harmonique est imposé par la source.
Les harmoniques d'encoches rotoriques (RSH)	$RSH = (\nu \cdot f_s \pm k \cdot N_b \cdot f_r)$	De la structure naturelle de la machine asynchrone à cage (la distribution discrète des encoches rotoriques).
Les harmoniques de défaut d'excentricité (EFH)	$EFH = (\nu \cdot f_s \pm k \cdot f_r)$	Excentricité mixte résiduelle.
Les harmoniques de défaut de barres rotoriques (RBFH)	$RBFH = (\nu \pm 2 \cdot k \cdot s) f_s$	L'asymétrie résiduelle du moteur au niveau du rotor.

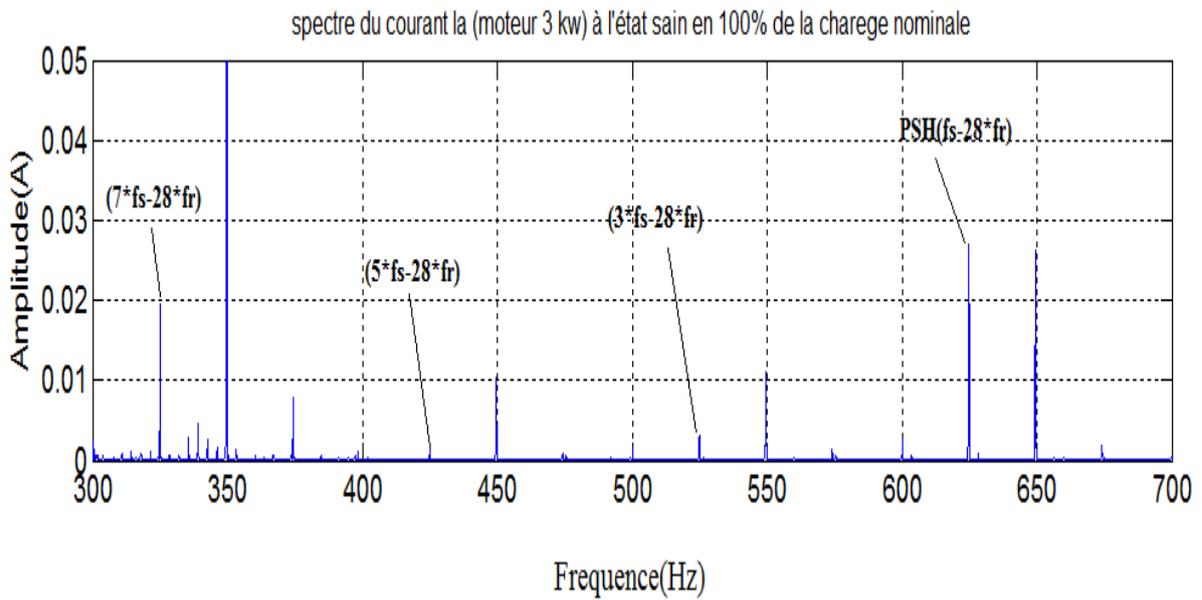
Tab. II.1. Les harmoniques du courant statorique.

Avec : $k = 1, 2, 3, \dots$; $f_s = 50$ Hz ; $N_b = 28$ barres. $\nu = 1, 3, 5 \dots$

Nous exposons sur la **Tab.II.1.** le spectre du courant statorique pour un fonctionnement à 100% de la charge nominale ($g = 0.036$) avec la représentation les quatre familles des harmoniques (a. TH, b. RSH, c. EFH et d. RBFH).



a. Les harmoniques *TH*



b. Les harmoniques *RSH*

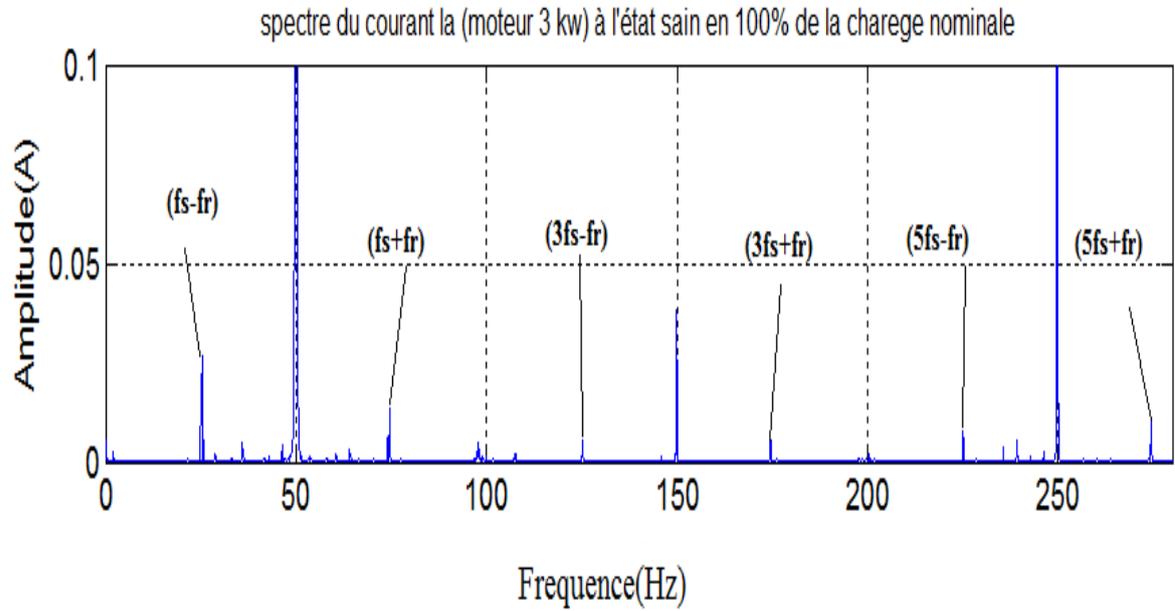
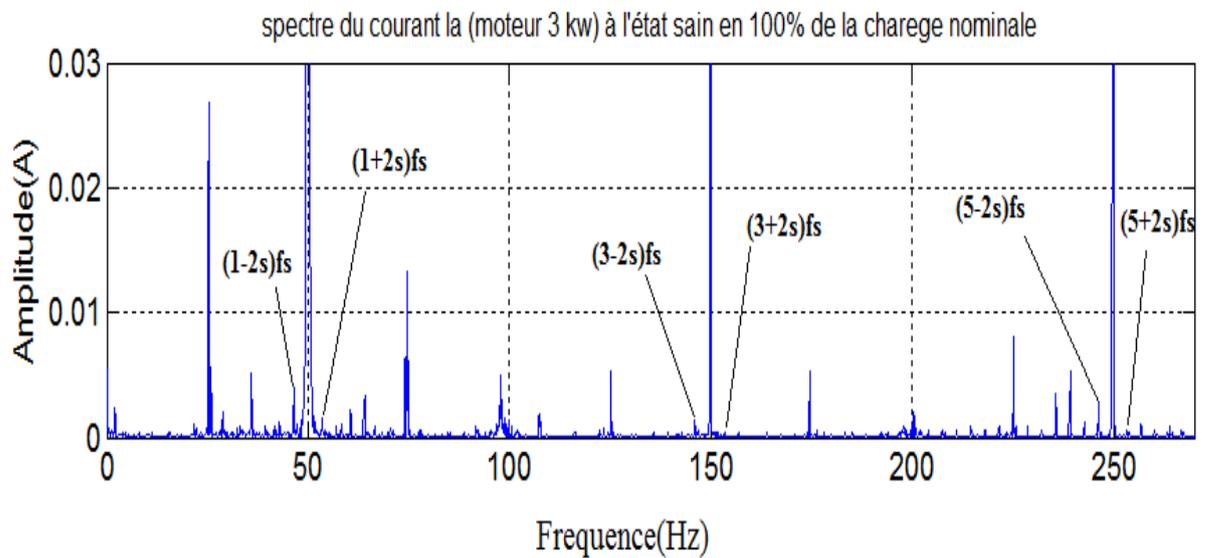
c. Les harmoniques *EFH*d. Les harmoniques *RBFH*

Figure. II.1. Spectre du courant I_a à l'état sain en 100% de la charge nominale, avec les quatre familles des harmoniques (a.TH, b. RSH, c. EFH, d. RBFH).

II.4. RELATION ENTRE LES (RSH, EFH, RBFH) ET LA VITESSE DE ROTATION

$$f_{RSH} = (\nu \cdot f_s \pm K \cdot N_b \cdot f_r) \quad \Rightarrow \quad f_r = \frac{|f_{RSH} \pm \nu \cdot f_s|}{N_b \cdot K} \quad (\text{II. 3})$$

$$f_{EFH} = (\nu \cdot f_s \pm K \cdot f_r) \quad \Rightarrow \quad f_r = \frac{|f_{EFH} \pm \nu \cdot f_s|}{K} \quad (\text{II. 4})$$

$$f_{RBFH} = (\nu \pm 2 \cdot K \cdot s) f_s \quad \Rightarrow \quad f_r = \frac{|f_s(\nu+2k) \pm f_{RBFH}|}{2k} \quad (\text{II. 5})$$

Avec $s = \frac{f_s - f_r}{f_s}$

Alors que

ν : 1, 3, 5... L'ordre du temps harmonique.

f_s : La fréquence fondamentale.

s : le glissement du moteur.

N_b : Nombre de barres rotoriques de moteur asynchrone à cage.

f_r : La vitesse mécanique du rotor exprimée en Hertz.

k : 1, 2, 3, ...

p : nombre de paires de pôles.

n_r : La vitesse mécanique du rotor exprimée en (tr/min).

Remarque :

Il est clairement visible que ce spectre est très riche en harmoniques. Pour ne pas se perdre dans l'interprétation du spectre, rappelons ici que notre objectif primaire est de vérifier la présence l'harmonique RSH dont la fréquence sont donnée par l'expression (II.3).

II.5. PRESENTATION DES RSH DANS LA BANDE FREQUENTIELLE

Afin d'améliorer la représentation, on a tracé les spectres du courant dans quatre bandes fréquentielles (0—170Hz, 170—470Hz, 470—870Hz et 870—2000) et en ne considérant que les amplitudes supérieures à -80dB. La figure II.7 montre l'existence d'harmonique RSH. D'autre part, on remarque que le contenu spectral du courant statorique ne se limite pas au harmonique RSH. On observe l'existence des composantes spectrales qui contribuent à augmenter la richesse harmonique de ce signal. Ces composantes reflètent l'imperfection naturelle du moteur et leurs fréquences peuvent être déterminées en analysant l'induction magnétique dans l'entrefer pendant le fonctionnement du moteur.

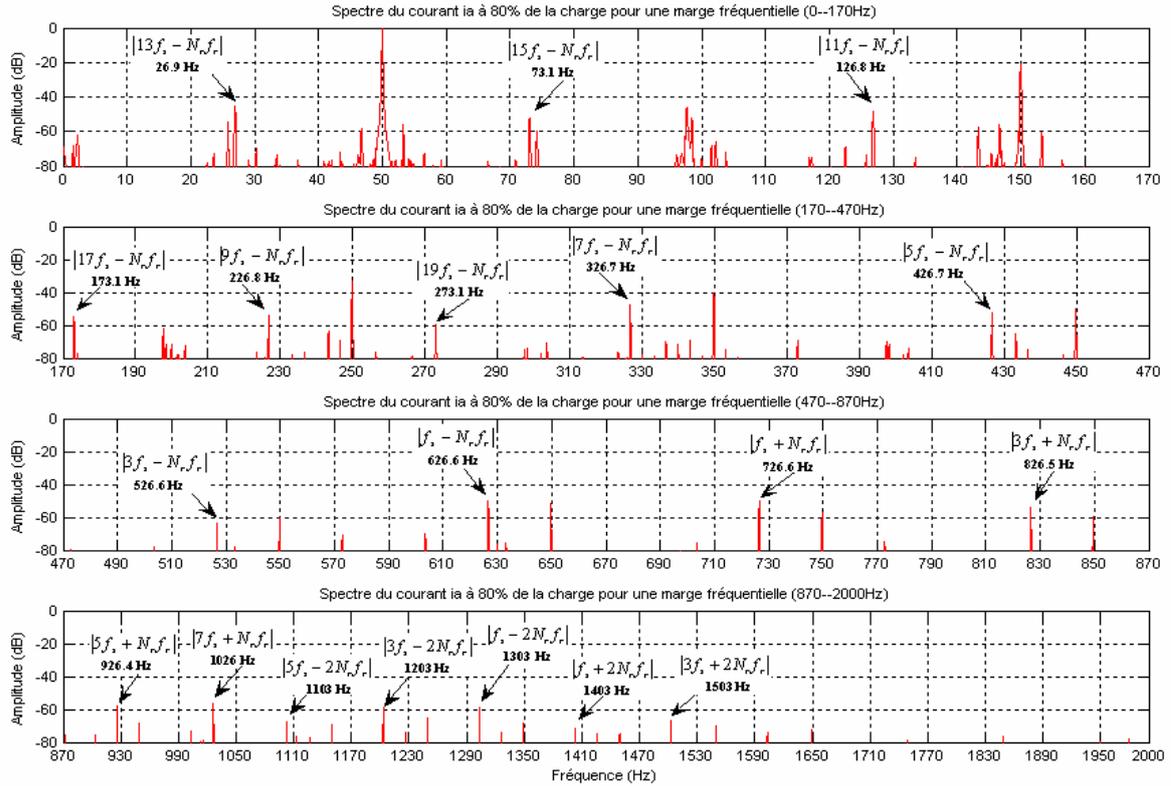


Fig. II.2 : Présence des harmoniques RSH.

II.5.1. EFFET DE LA CHARGE SUR LES RSH

Afin de voir l'effet de la charge sur les RSH, nous avons tracé les spectres du courant statorique pour chaque régime de fonctionnement.

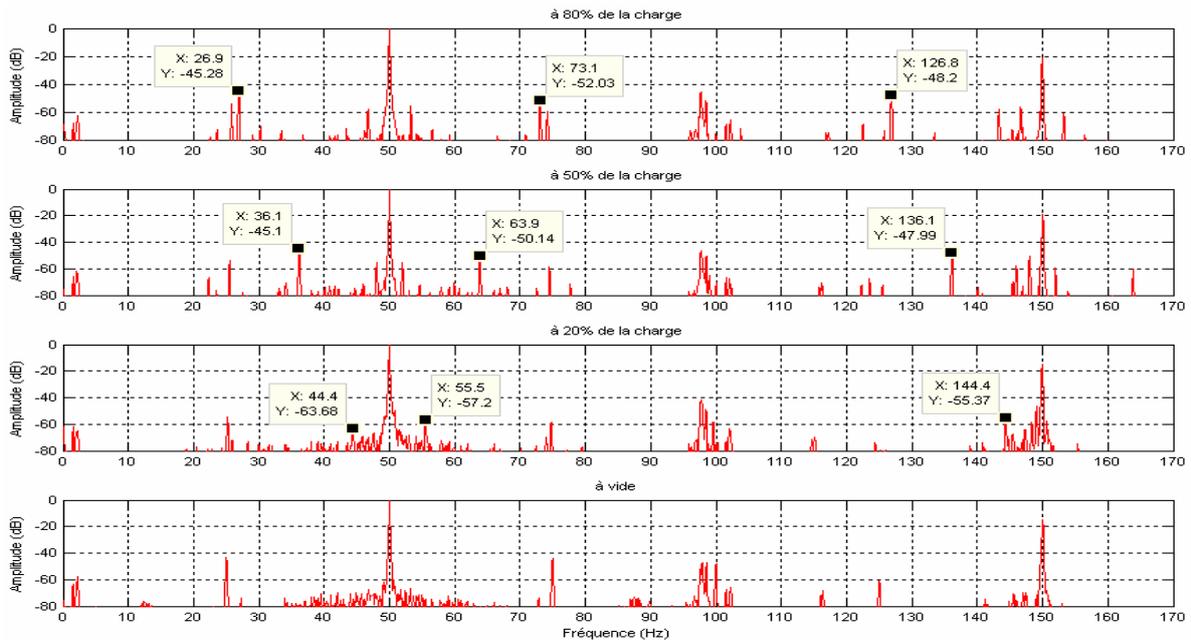


Fig. II.3 : Effet de la charge sur les RSH pour la marge fréquentielle 0-170Hz.

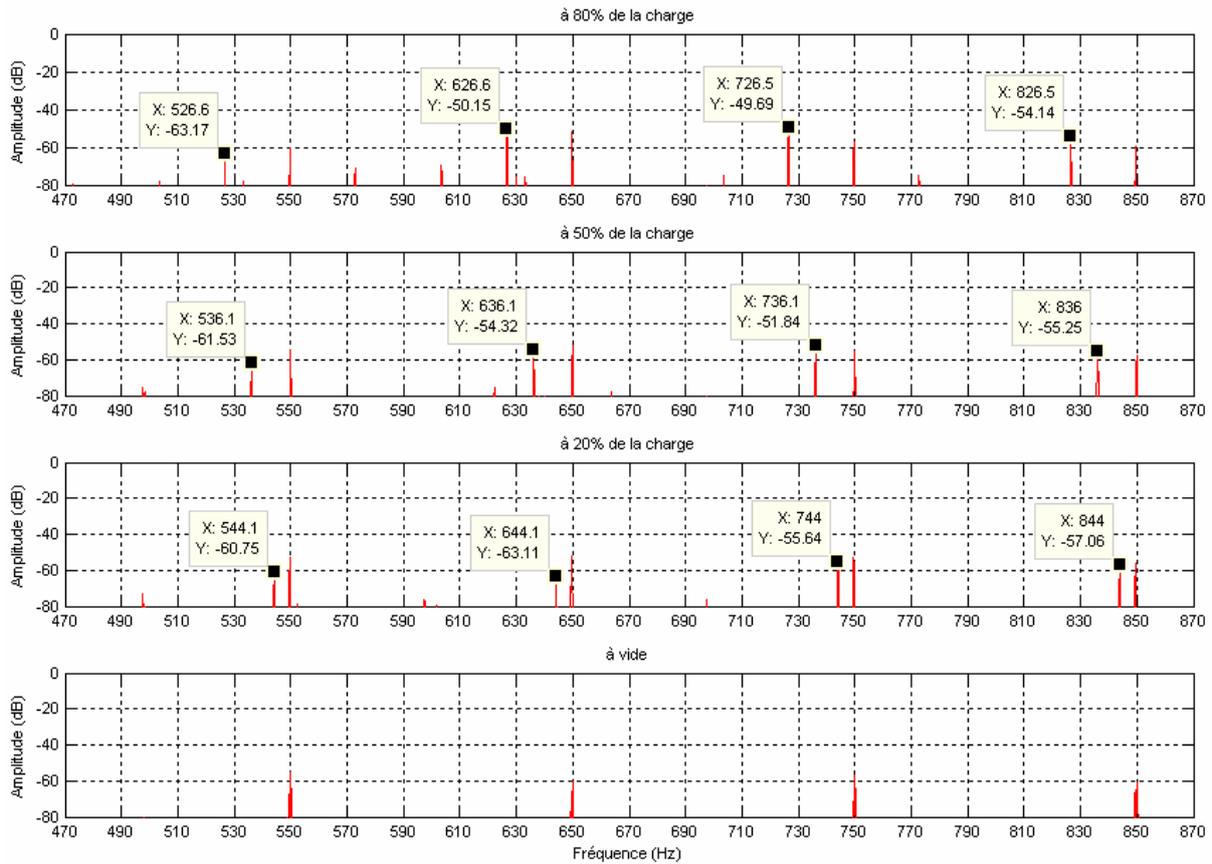


Fig. II.4 : Effet de la charge sur les RSH pour la marge fréquentielle 470-870Hz.

D'après les figures II.2, II.3 et II.4, on peut constater que les fréquences des RSH sont très sensibles à la variation de la charge car elles sont rigidement liées au glissement. D'autre part, leurs amplitudes s'affaiblissent en diminuant la charge. On remarque aussi qu'à vide, les RSH sont difficilement détectables car ils ont des amplitudes très faibles et des fréquences très proches aux fréquences des harmoniques du temps (TH). On observe également que les amplitudes des TH sont peu influencées par le régime de fonctionnement et que leurs fréquences sont indépendantes du glissement parce qu'ils ont été imposés par l'alimentation.

II.6. DEFINITION DES (PSH)

Les moteurs asynchrones sont généralement alimentés par des tensions non sinusoïdales. Donc, chaque harmonique de l'alimentation produit une paire de RSH dans le spectre du courant statorique. Cependant, les deux RSH dominantes sont ceux produits par l'harmonique fondamentale et ils ont généralement la plus grande amplitude. Ces RSH sont souvent appelés harmoniques principaux d'encoches (PSH). Les fréquences PSH sont données par l'expression suivante :

Pour $k=1$ et $\nu=1$

$$f_{PSH} = (N_b \cdot f_r \pm f_s) \quad (\text{II. 6})$$

Avec $f_r = \frac{(1-s)}{p} f_s$

$$f_r = \frac{(f_{PSH} \pm f_s)}{N_b} \quad (\text{II. 7})$$

Ou en tours par minute par:

$$n_r = 60 \frac{(f_{PSH} + f_s)}{N_b} \quad (\text{II. 8})$$

Dans cette étude, nous avons choisi le premier harmonique PSH pour l'estimation de la vitesse. Ce choix est justifié par la présence de cette harmonique dans une zone où il y a moins de composantes spectrales gênant la détection du PSH. En conséquence, on peut mettre en évidence le caractère d'amplitude comme un choix pour détecter le PSH avec précision principale.

II.6.1. effet de la charge sur les PSH

La Figure II.5 montre les spectres de courant de stator pour différentes conditions de charge mécanique. Comme on peut l'observer, la charge du moteur a une influence significative sur les fréquences PSH. En fait, la fréquence PSH se déplace dans une bande de fréquence limitée par le minimum et le glissement du moteur maximale. Cette contrainte est très importante. En fait, toutes méthodes d'estimation de la vitesse doivent

prendre en considération la variation de la position du PSH en fonction de la charge.

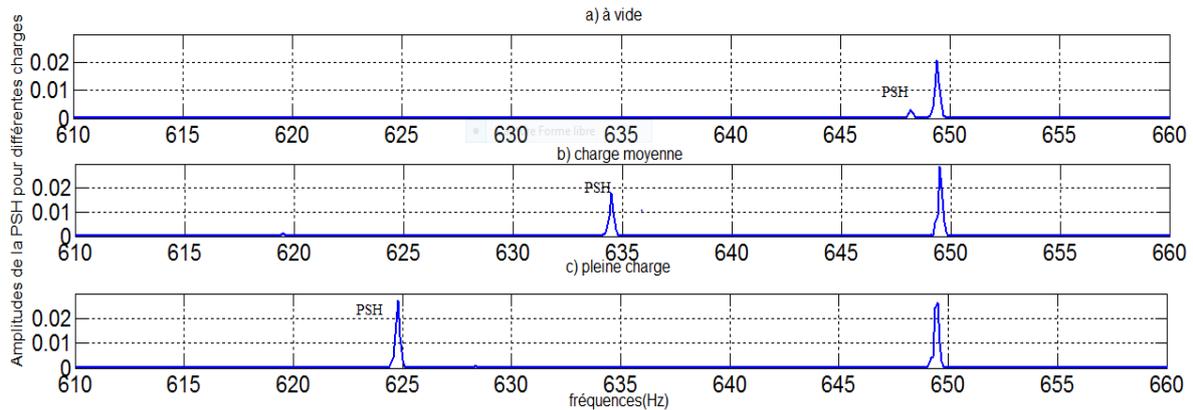


Fig. II.5 : Spectre de courant statorique pour différentes conditions de charge mécanique.

II.7.LA METHODE DE PRONY

Cette méthode classique, remontant à 1795, connaît un regain d'intérêt d'une part grâce à l'évolution des moyens de calculs et d'autre part grâce à ses capacités à résoudre des problèmes dans les domaines où les méthodes classiques sont inefficaces [AGR 16].

La méthode de Prony est une technique de traitement de signal qui permet d'extraire les caractéristiques d'harmoniques en résolvant un ensemble d'équations non linéaires.



Supposant un signal $x(t)$ de N échantillons, la méthode de Prony exprime les données d'échantillonnage en une combinaison linéaire de P fonctions exponentielles complexes :

$$\hat{x}(n) = \sum_{k=1}^P h_k z_k^{n-1} \tag{II.9}$$

$\hat{x}[n]$: Le signal estimé.

$$h_k = A_k e^{j\varphi_k} \text{ et } z_k = e^{(\alpha_k + j2\pi f_k)T_s}$$

Où T_s est la période d'échantillonnage. $A_k, f_k, \varphi_k, \alpha_k$ ce sont les paramètres du model. Ils représentent respectivement les inconnus : L'amplitude, la fréquence, l'angle de phase et le facteur d'amortissement de la $k^{ième}$ composante est l'ordre du modèle L'équation(II.9)est une équation non linéaire qui peut être résolue en utilisant la méthode de Prony.

En fait, la méthode de Prony consiste à construire une équation de différence homogène et linéaire à coefficients constants (avec $a_0 = 1$):

$$\sum_{k=0}^p a_k x[n - k] = 0 \quad (\text{II.10})$$

Dans la méthode de Prony classique, le nombre d'échantillons disponibles est supposé être égal aux paramètres inconnus du modèle, par conséquent, l'équation de différence linéaire (II.10) peut être exprimée sous forme matricielle de la façon suivante :

$$X.A = -Y \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Où : } x = \begin{bmatrix} x[p] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[2p-1] & \cdots & x[p] \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x[p+1] \\ \vdots \\ x[2p] \end{bmatrix}$$

Les paramètres a_k sont déterminés en résolvant (II.11). Ensuite, un polynôme caractéristique avec des racines z_k peut être formé en utilisant les paramètres de prédiction a_k comme suit:

$$F(z) = \sum_{k=0}^p a_k z^{p-k} \quad (\text{II.12})$$

Par conséquent, le facteur d'amortissement et la fréquence peuvent être déduits directement partir des racines de polynôme (II.12):

$$\alpha_k = \frac{\ln|z_k|}{T_s} \text{ et } f_k = \frac{1}{2\pi T_s} \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(z_k)}{\text{Re}(z_k)} \right]$$

Enfin, les racines z_k sont utilisées pour écrire les P équations de (II.9) sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_1^{p-1} & z_2^{p-1} & \cdots & z_p^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(p) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

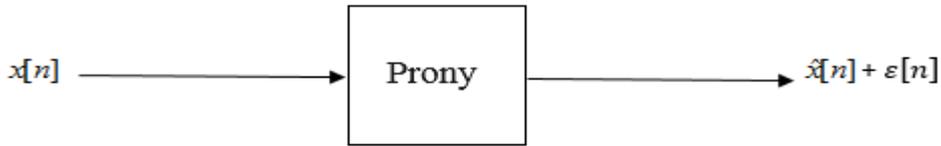
Les paramètres complexes h_k peuvent être déterminés en résolvant l'équation (II.13) et, par conséquent, l'amplitude et l'angle de phase (A_k, φ_k) peuvent être obtenus en utilisant les relations suivantes:

$$A_k = |h_k| \text{ et } \varphi_k = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(h_k)}{\text{Re}(h_k)} \right]$$

Il a noté que les performances de la méthode de Prony classique deviennent instables en présence de bruit. Cela est dû au fait qu'il n'y a aucune erreur considérée dans le modèle.

Cependant le signal réel est toujours noyé dans le bruit et pour prendre en considération cette situation, l'équation(II.9) devrait être modifiée comme suit [CHN10]:

$$x[n]=\hat{x}[n]+\varepsilon[n]=\sum_{k=1}^P h_k z_k^{k-1}+\varepsilon[n] \quad (\text{II.14})$$



II.8.La METHODE DE PRONY MODIFIER

Ou $\varepsilon[n]$ représente l'erreur d'approximation entre le signal réel $x[n]$ et celui estimé $\hat{x}[n]$. Le problème d'estimation de paramètre est basé donc sur la minimisation de l'erreur quadratique sur les N échantillons :

$$E = \sum_{n=1}^N |\varepsilon[n]|^2 = \sum_{n=1}^N |x[n] - \sum_{k=1}^P h_k z_k^{n-1}|^2 \quad (\text{II.15})$$

Dans la pratique, le nombre des échantillons disponibles est supérieur au nombre des paramètres inconnus ($N > 2P$). Dans ce cas, l'équation aux différences linéaire (II.16) doit être modifiée comme suit :

$$\sum_{k=0}^P a_k x[n - k] = \varepsilon[n] \quad (\text{II.16})$$

Les N échantillons de données disponibles sont utilisés pour réécrire(II.16) sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} x[P] & \cdots & x[1] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x[N-1] & \cdots & x[N-P] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_P \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} x(P+1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Le vecteur des paramètres inconnu a_k est choisi pour minimiser l'erreur quadratique totale de prédiction linéaire. La minimisation peut être résolue en utilisant la méthode des moindres carrés. En outre, l'estimation des paramètres complexes h_k est effectuée aussi par la méthode des moindres carrés. Dans ce cas, l'ensemble d'équations linéaires(II.11) devrait être modifié sous la forme compacte suivante [SAH15]:

$$Z.H=C \quad (\text{II.18})$$

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ z_1 & \dots & z_P \\ \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{N-1} & \dots & z_P^{N-1} \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_P \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} x(1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Par conséquent, la méthode de prony consiste aux trois étapes suivantes :

Etape 1:

La détermination des paramètres de prédiction linéaire α_k . Cette étape est réalisée par la résolution de l'équation(II.17).

Etape 2:

Trouver les racines z_k du polynôme caractéristique à partir de l'équation (II.12). Les racines z_k permettent la détermination de α_k et f_k .

Etape 3:

Résoudre l'équation (II.18) par la méthode des moindres carrés ce qui permet la détermination des A_k et ϕ_k .

La figure ci-dessous résume le principe général de l'algorithme d'estimation de la vitesse par la méthode de Prony :

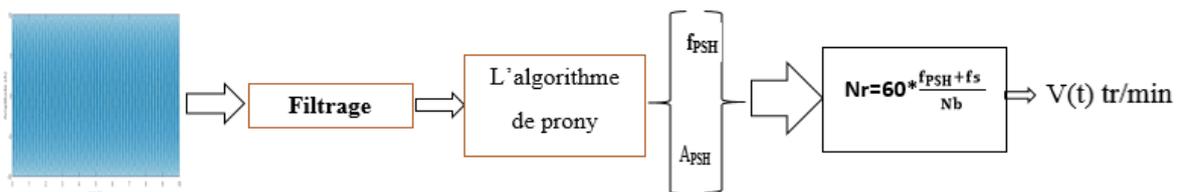


Fig. II.6 : Principe général de l'algorithme d'estimation de la vitesse par la méthode de prony.

II.9. APPLICATION DE LA METHODE DE PRONY

L'algorithme de la méthode de Prony est implanté sous l'environnement Matlab. Pour tester le fonctionnement de cette méthode, nous avons appliqué son algorithme sur un signal générique simple monocomposante. Ce signal est défini comme suit :

$$x(t) = 20 \times \sin(2\pi \times 60 \times t) \quad (\text{II.20})$$

Avec :

La fréquence d'échantillonnage : $f_e = 10000 \text{ Hz}$

Le nombre des échantillons : $N_e = 6$ échantillons

La figure III.2 et III.3représentent l’allure temporelle et le spectre du signal généré d’amplitude 20 A et de fréquence 60Hz.

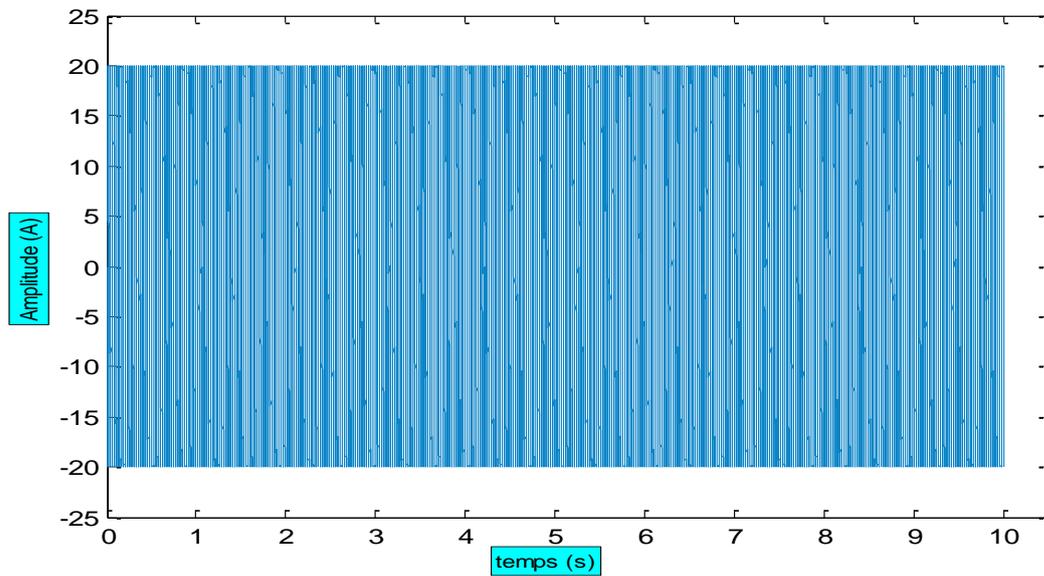


Fig.II.7:Signal généré monocomposante.

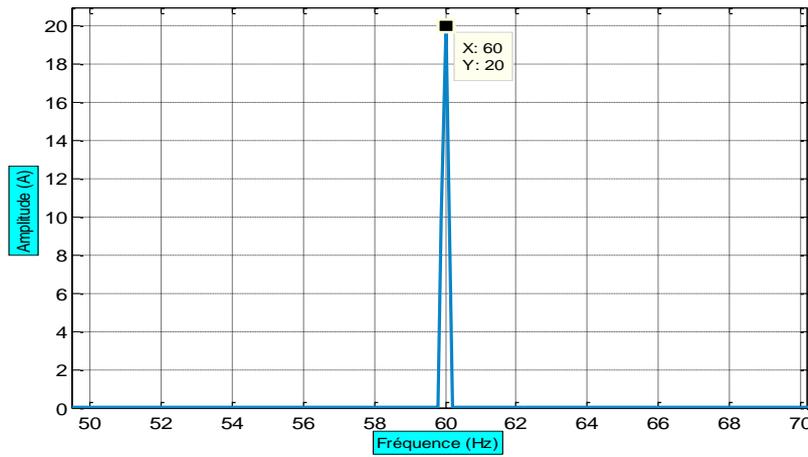


Fig.II.8 :Le spectre du signal généré monocomposante.

		Valeur réelle	Valeur estimée	Erreur	Nombre de points utilisés
<i>Méthode de Prony</i>	Amplitude	20	20.000	0	6 Echantillons
	Fréquence	60	60.000	0	
<i>Méthode de la FFT</i>	Amplitude	20	20.000	0	10000Echantillons
	Fréquence	60	60.000	0	

Tab. II.2 :L’amplitude et fréquence estimées par les méthodes de prony et FFT.

Remarque : Le nombre des échantillons minimale dans cette exemple (méthode de prony) $N_e = 5$ échantillons si la valeur plus bas de cette valeur L'algorithme de Prony ne fonction pas.

Le tableau II.2 montre les résultats obtenus par l'application de la méthode de Prony et celle de la FFT. Il est nettement clair que la méthode de Prony estime, avec une grande précision, l'amplitude et la fréquence du signal générique. De plus, on remarque que la méthode de Prony est besoin seulement de 6 échantillons pour qu'il donne des résultats comparables à ceux obtenus par la FFT qui nécessite au moins 10000 échantillons.

II.9.1. algorithme de prony a fenêtre glissante(PFG)

Cette méthode consiste à subdiviser le signal en plusieurs fenêtres de petites tailles ; et chaque fenêtre sera analysée par la méthode de prony. Le principe de cette méthode est présenté dans la figure II.9. Le choix de la taille de la fenêtre est une tâche critique. En effet, l'augmentation de la taille de la fenêtre améliore la précision des résultats d'une part mais d'une autre part, elle augmente le temps de calcul. On doit donc trouver un compromis entre la rapidité et la précision. De plus, le pas de déplacement de la fenêtre a une grande influence sur la résolution temporelle. En fait, un pas très petit, permet de suivre les variations brusques qui peuvent se manifester lors de l'acquisition du signal.

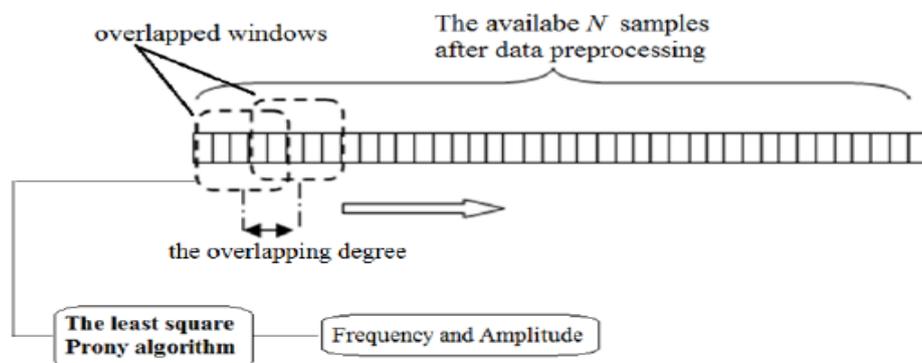


Fig. II.9 : Méthode de prony à fenêtre glissante.

II.9.2. application sur un signal génère mono-composante

Le signal utilisé précédemment $x(t)$ a été utilisé pour tester la méthode de Prony à fenêtre glissante. Nous avons choisi une fenêtre de 6 échantillons qui déplace d'un pas égal à 1 échantillon. L'ordre du modèle est choisi toujours à $P=3$ car on a seulement un harmonique à estimer.

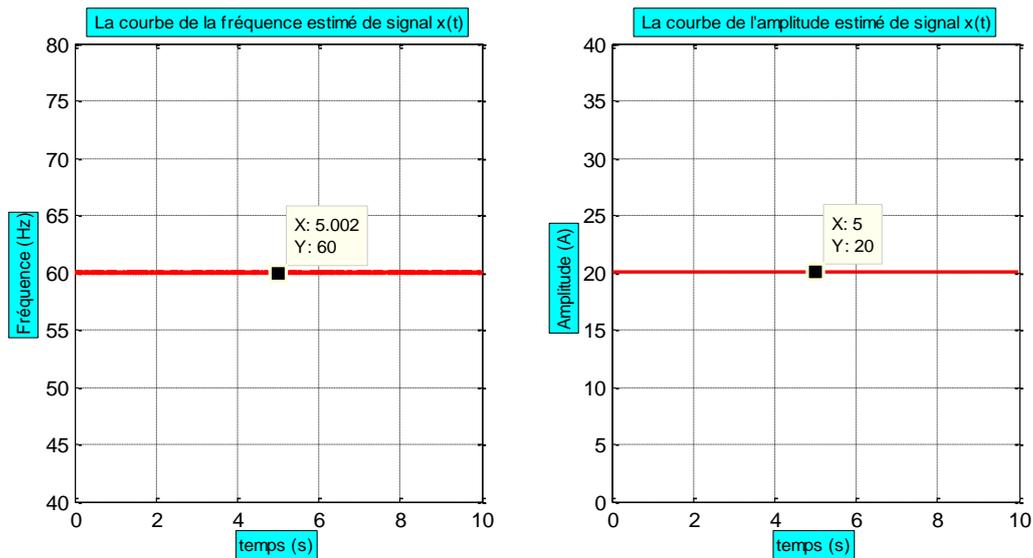


Fig.II.10 : Fréquence et Amplitude estimée par la méthode de PFG.

La figure II.10 montrent l'évolution temporelle de la fréquence et l'amplitude estimées par la méthode de PFG. On remarque la grande précision de résultats obtenus.

II.9.3. application sur un signal genre mono-composante non-stationnaire

Pour confirmer l'efficacité de la méthode PFG, on a appliqué son algorithme sur un signal généré mono-composante contenant une non-stationnarité dans sa fréquence et amplitude comme suivant :

$$Is(t) = 10 \times \sin(2\pi \times 60 \times t) \quad (\text{II.21})$$

Où l'amplitude et la fréquence prend la valeur 10 A et 60 Hz dans l'intervalle du temps $[0s : 0.5s]$ puis 5 A et 50 Hz dans l'intervalle $[0.5s : 1s]$.

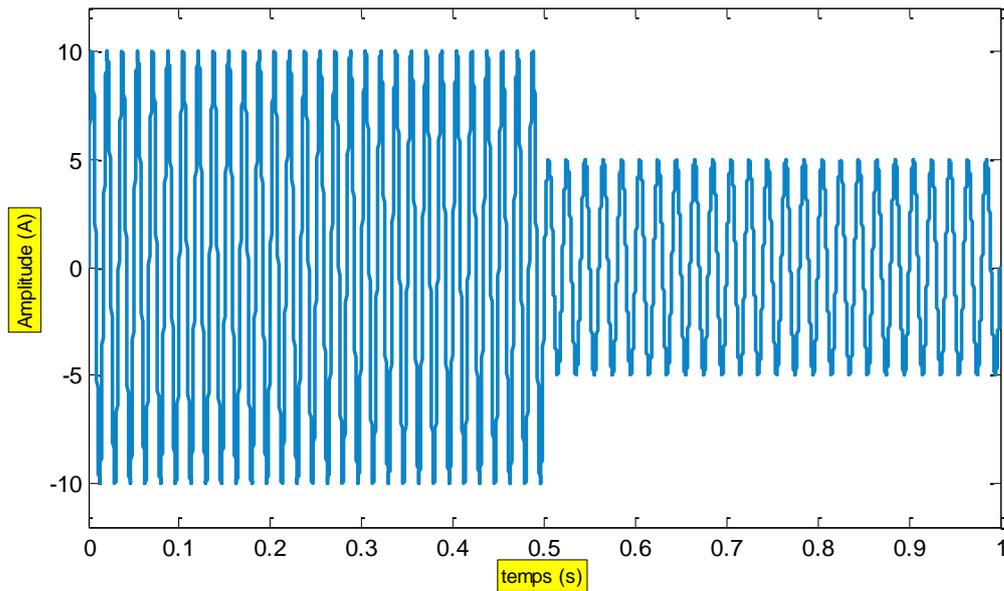


Fig. II.11 : L'allure temporelle du signal génère non-stationnaire.

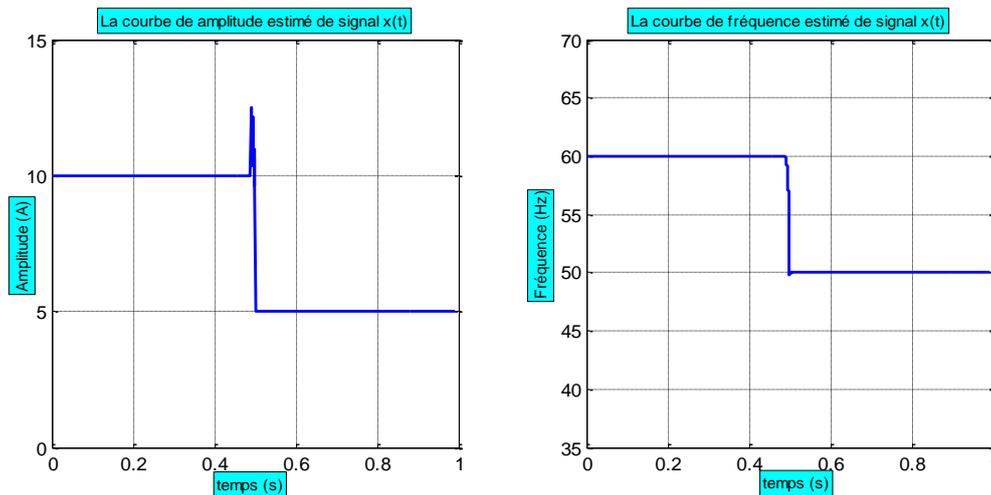


Fig. II.12 : Fréquence et l'amplitude estimée d'un signal non-stationnaire.

D'après la figure II.12 il est clairement visible que la suivi de la fréquence l'harmonique cible est vérifiée. Ce résultat confirme que la PFG a l'aptitude d'estimer et de suivre les fréquences des harmoniques même pour les signaux non stationnaires.

II.9.4.application sur un signal génère multi-composantes

pour confirmer la précision et la bonne estimation de l'algorithme de PRONY en a tester avec un signal très compliqué c'est un signal multi-harmonique On a choisi un signal contenant trois harmoniques. Le signal est défini comme suit :

$$x(t) = 10. \sin(2. \pi. 50. t) + 7. \sin(2. \pi. 100. t) + 4. \sin(2. \pi. 70. t) \quad (\text{II.22})$$

La fréquence d'échantillonnage est toujours 10 kHz.

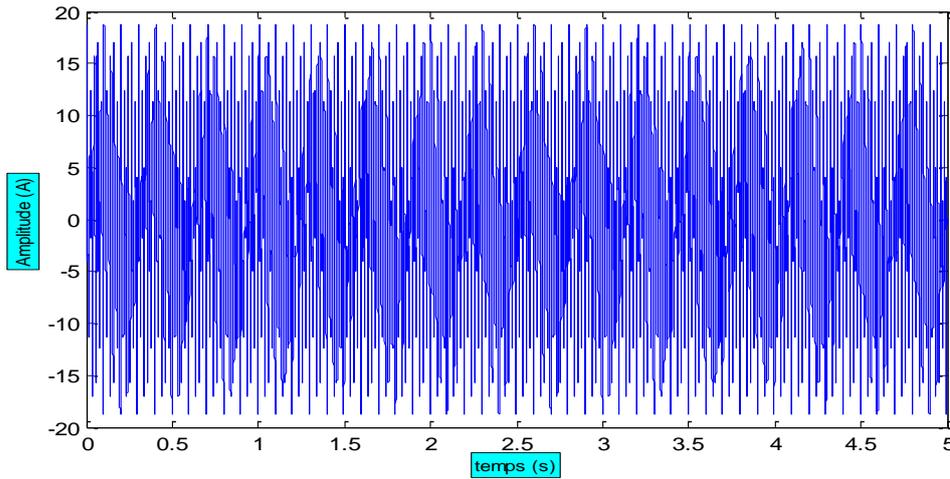


Fig. II.13 : L'allure temporelle du signal génère multi-harmonique.

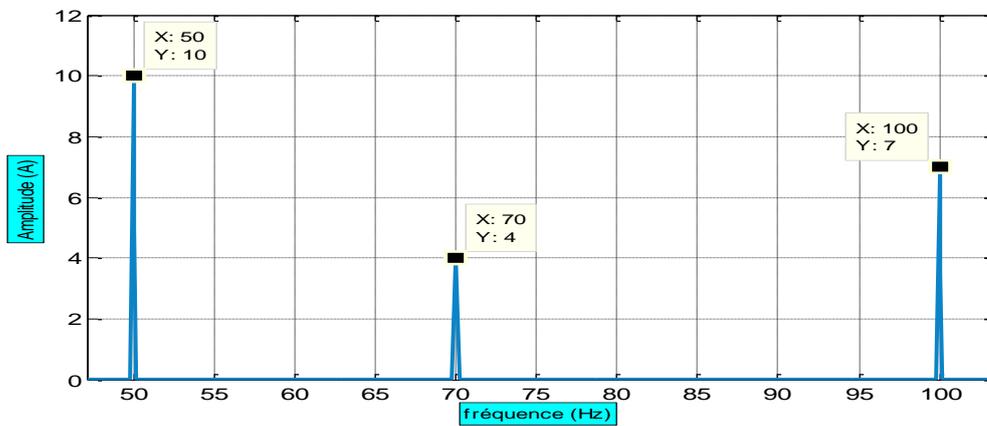


Fig. II.14: Spectre du signal généré de trois composantes.

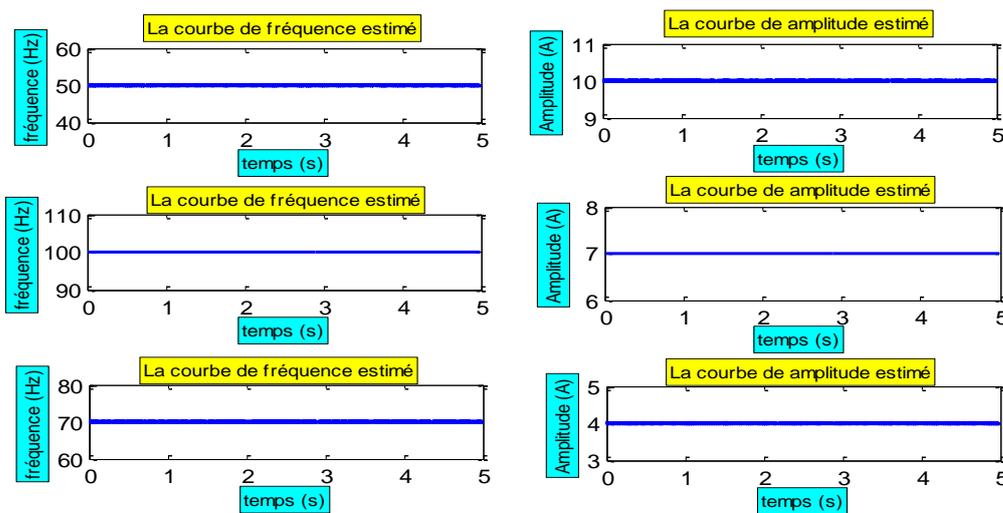


Fig. II.15 : Fréquence et l'amplitude estimée d'un signal complique par la méthode de PFG.

D'après la figure II.15 en constat bien que le signal comporte plusieurs harmoniques l'évolution de l'amplitude et la fréquence estimées par la méthode PFG donne la grande précision.

II.10. EFFET DU BRUIT SUR LES RESULTATS

Et maintenant, nous allons tester la méthode de Prony sur un signal avec différent degrés de bruit. L'objectif est d'étudier l'effet du bruit sur les performances de la méthode PFG. Pour étudier la réaction de la méthode de Prony pour un signal bruité. Le bruit est une contrainte très importante qui peut réduire la qualité de l'estimation et augmente par conséquent l'erreur, nous avons utilisé signal à trois composantes mais cette fois, on a ajouté un signal de bruit $b(t)$. Le degré de bruit est mesuré par son SNR (signal-to-noise ratio) qui est défini par :

$$SNR = 10 \log_{10} \left[\frac{\text{PUISSANCE DE SIGNAL}}{\text{PUISSANCE DE BRUIT}} \right]$$

Ce signal est défini comme suit:

$$x(t) = 10 \times \sin(2\pi \times 50 \times t) + 2 \times \sin(2\pi \times 48 \times t) + 3 \times \sin(2\pi \times 52 \times t) + b(t) \quad (\text{II.23})$$

La fréquence d'échantillonnage : $f_e = 10000 \text{ Hz}$

Le nombre des échantillons : $N_e = 100$ échantillons.

Et pour vérifier l'effet de bruit (SNR) sur le signal et Pour donner une information sur la qualité de ces résultats, en utilise un indicateur si l'erreur relative entre les grandeurs réelles et celles estimées. Les erreurs d'estimation sont définies par :

$$E_{\text{fréq}(\%)} = 100 \left(\frac{\text{fréel} - \text{festimé}}{\text{fréel}} \right) \quad (\text{III.24})$$

$$E_{\text{ampli}(\%)} = 100 \left(\frac{\text{Aréel} - \text{Aestimé}}{\text{Aréel}} \right) \quad (\text{III.25})$$

Effectivement les formules (II.24), (II.25) peuvent calculer l'erreur pour chaque point d'estimation.

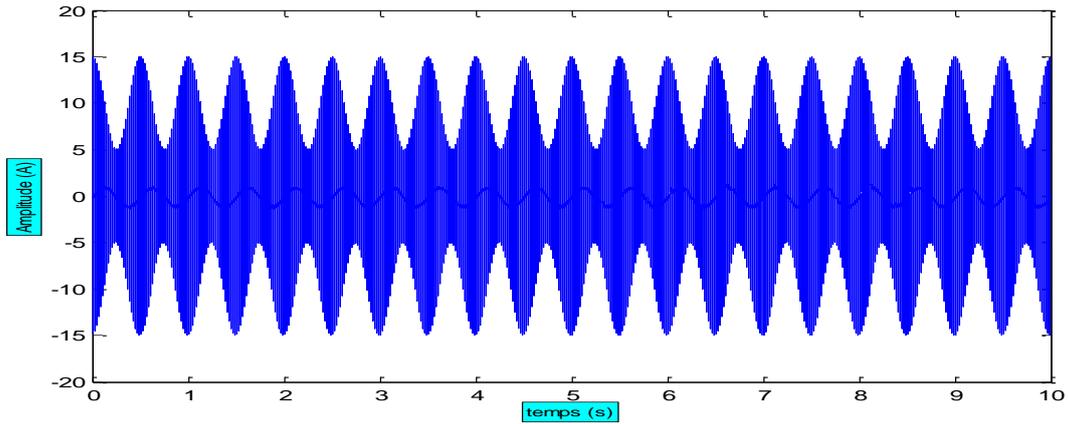


Fig. II.16 : Les allures temporelles du signal avec SNR=50

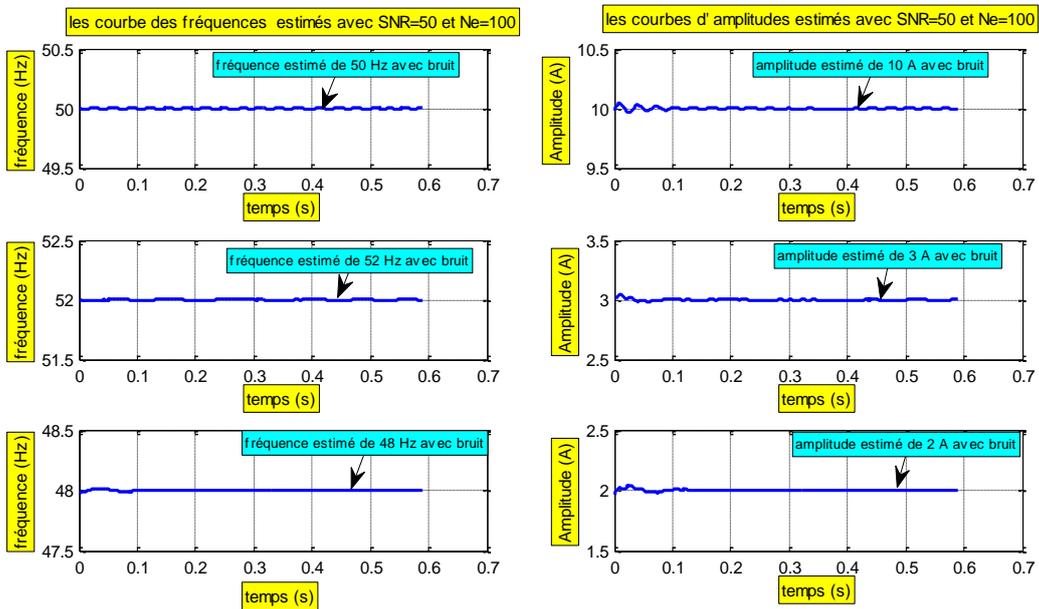


Fig. II.17 : Fréquence et Amplitude estimées d'un signal générique à trois composants avec valeur de SNR=50.

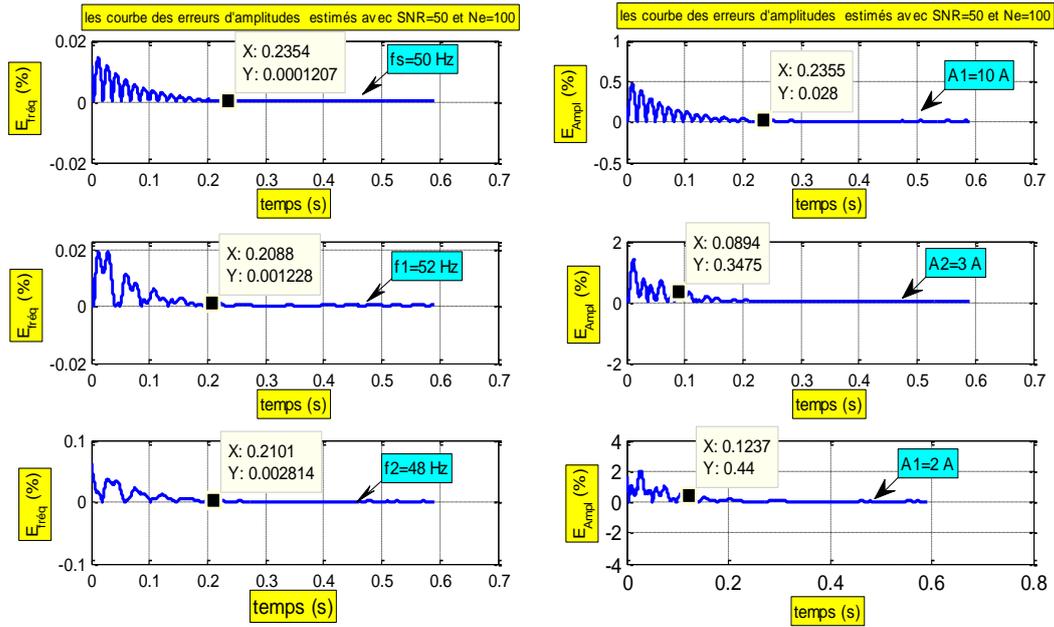


Fig. II.18 : Erreur d'estimation (%) de fréquence et amplitude avec SNR=50

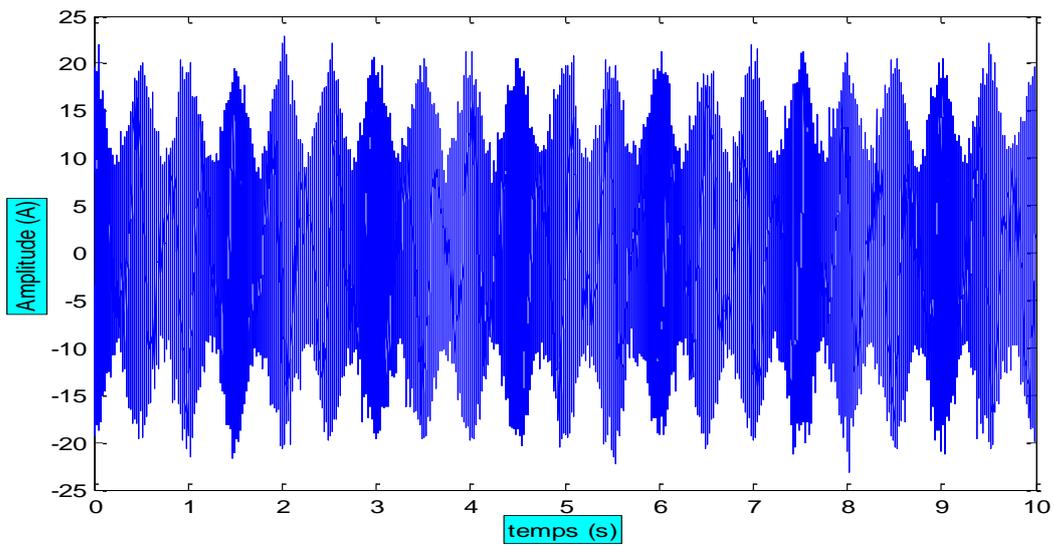


Fig. II.19 : Les allures temporelles du signal avec SNR=10

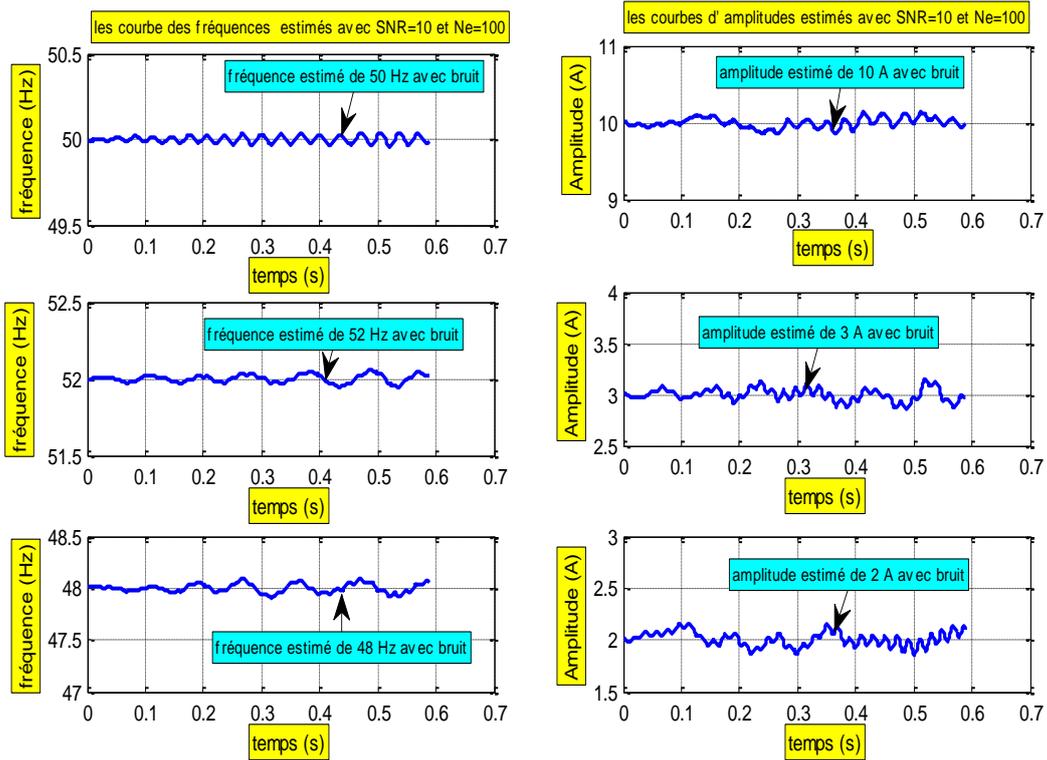


Fig. II.20 : Fréquence et Amplitude estimées d'un signal générique à trois composants avec valeur de SNR=10.

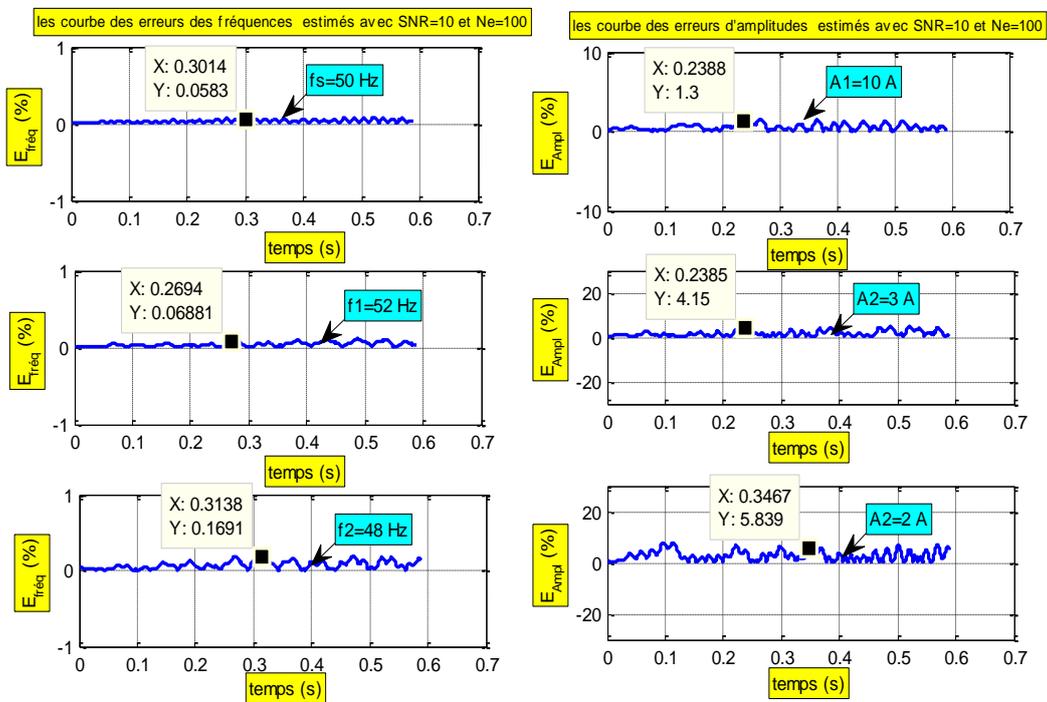


Fig. II.21 : Erreur d'estimation (%) de fréquence et amplitude avec SNR=10

D'après les figures (Fig. II.17, Fig. II.18, Fig. II. 20 et Fig. II.21) On observe que notre méthode estime bien l'amplitude et la fréquence même pour des signaux bruités. On remarque

aussi que l'erreur augmente avec l'augmentation du niveau de bruit. L'augmentation du niveau de bruit (SNR) influe sur la valeur de l'erreur d'estimation qui devient importante. Par contre que l'augmentation des échantillons a une influence positive.

II.11.DETERMINATION DE L'INTERVALLE DE PREMIER PSH

Comme nous avons vu dans le 2^{ème} chapitre, la fréquence PSH existe dans un intervalle dont les limites dépendent du glissement 'g', le nombre des pôles 'P' et le nombre des barres rotorique 'N_b'. l'expression de la fréquence de la PSH1 est donnée par :

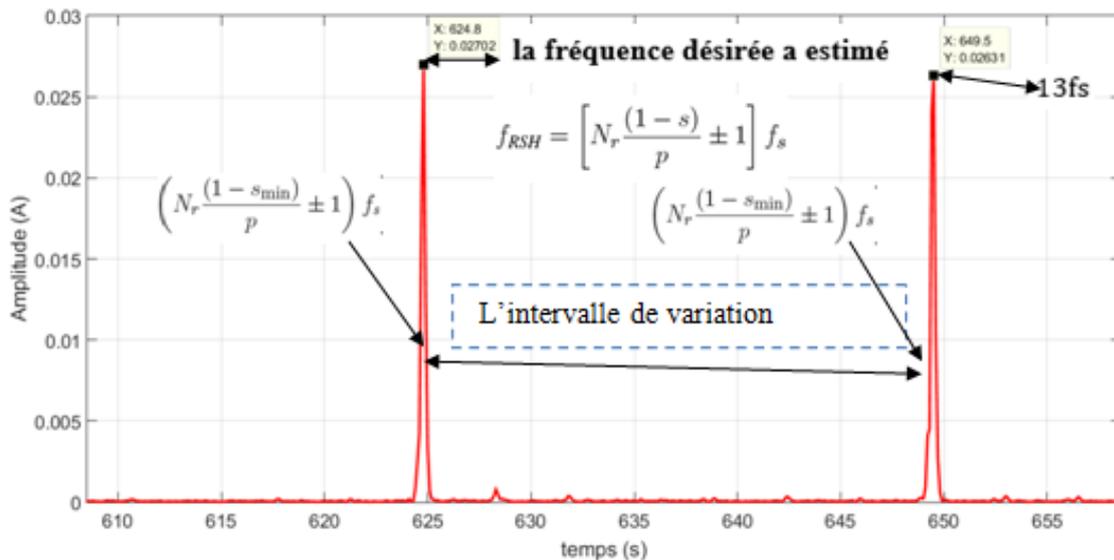


Fig. II.22 : Illustration de l'opération de recherche de f_{PSH} .

La figure II.22 montre les limites de l'intervalle de recherche dans lesquelles le PSH1 se déplace. Par conséquent, l'intervalle de recherche peut être défini comme suit :

$$f_{PSH1} \in \left[\left(N_r \frac{(1-g_{max})}{p} \pm 1 \right) f_s, \dots, \left(N_r \frac{(1-g_{min})}{p} \pm 1 \right) f_s \right] \quad (II.26)$$

Les limites de l'intervalle dépendent des valeurs max et min du glissement. Pour notre moteur, le $g_{min} = 0,0017$ et $g_{max} = 0,046$, ceux-ci correspondent respectivement à la très faible charge et la charge nominale. Par conséquent, l'intervalle de recherche de PSH1 est : [617Hz--648Hz]. Selon la Figure (II.22), la composante qui présente la plus grande amplitude dans l'intervalle de recherche, certainement correspond à l'harmonique PSH1. Il est à remarquer que dans cette zone de fréquences, il n'y aura pas un problème de chevauchement des harmoniques.

La figure (II.23) montre l'influence de la charge mécanique sur la position de la PSH1.

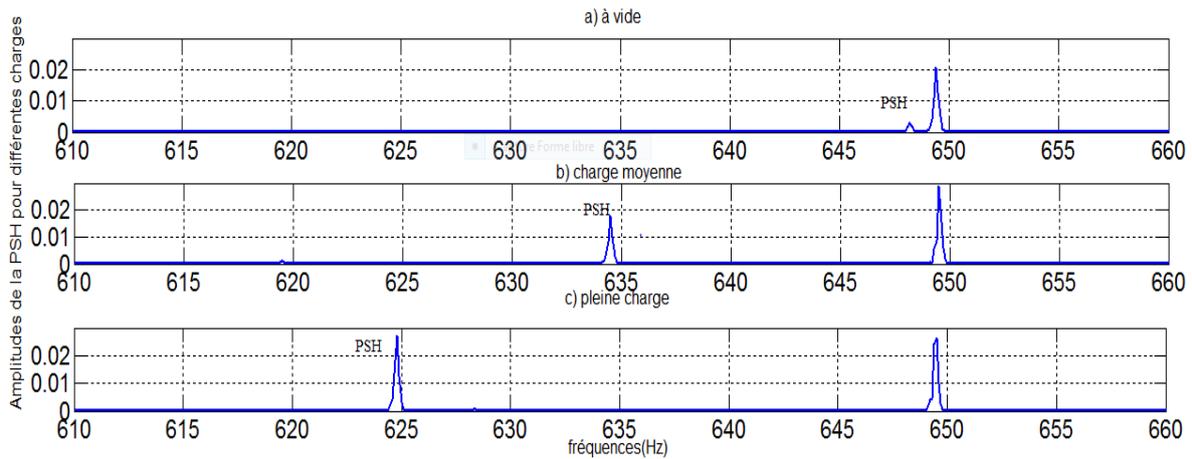


Fig. II.23 : Spectre du courant statorique expérimentale pour différents charge.

II.12. APPLICATION SUR DESSIGNAUX EXPERIMENTAUX

L'algorithme proposé pour l'estimation et le suivi des caractéristiques des harmoniques a été appliqué sur des signaux réels issus d'un banc d'essai expérimental décrit précédemment (voir le 2^{ème} chapitre). Le signal de courant a été échantillonné à la fréquence de 10 kHz pendant 10 s. ce qui permet d'obtenir 10000 échantillons.

II.12.1. Traitement préliminaire

II.12.1.1.L'acquisition des données

Lors de l'acquisition, le courant de stator est un signal analogique est transformé en un signal discret, caractérisé par un certain nombre des points des données et une fréquence d'échantillonnage déterminée.

La figure II.24 représente l'allure temporelle du signal réel de fréquence 50Hz.

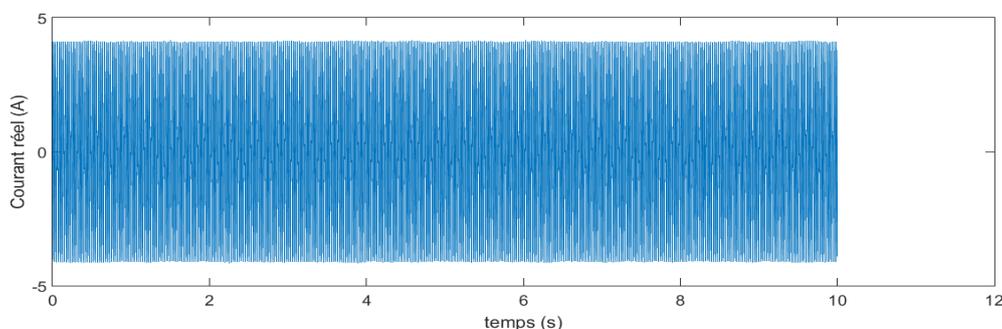


Fig.II.24 : L'allure temporelle du Signal réel d'un moteur asynchrone à 0% de la charge et à l'état sain.

II.12.1.2. filtrage

Effectivement, le filtrage du courant statorique ayant un effet direct sur la qualité des résultats. Le filtrage est effectué par un filtre passe-bas pour éliminer les harmoniques qui sont supérieurs de notre intervalle d'étude et un trois filtre passe-bande désigné pour permettre le passage de l'harmonique PSH_1 . En utilisant la fonction "fdesign.bandpass" à partir du Filtre Design boîte à outils de Matlab, un filtre passe-bande étroit est conçu et utilisé pour traiter le signal actuel après Acquisition (voir figure II.25). Les paramètres de ce filtre sont spécifiés pour permettre le passage des fréquences fondamentales et des deux bandes latérales uniquement. Les spécifications du filtre sont présentées en Tableau I.

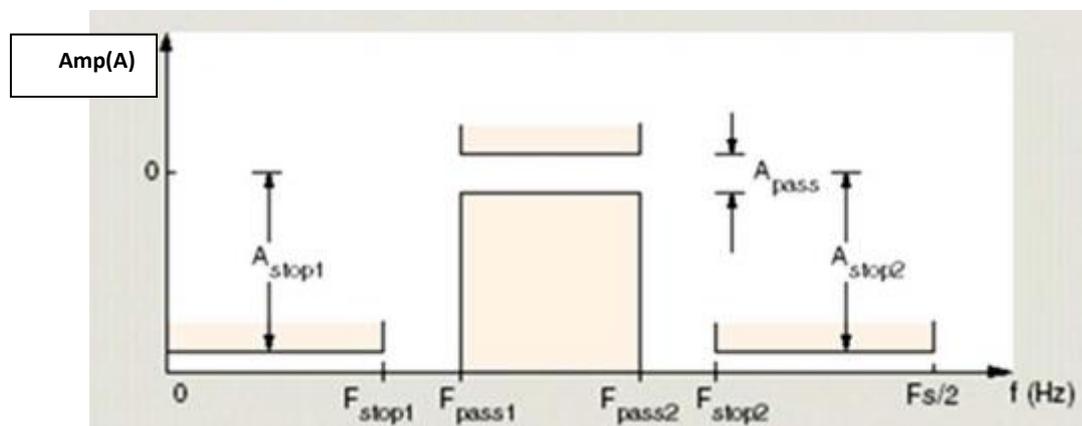


Fig.II.25: Conception générale du filtre passe-bande

Filtre passe-bande 1		Valeur
f_{stop1}	fréquence au niveau du début de la première bande de coupure	622 HZ
f_{pass1}	fréquence à la limite du début de la bande passante	622.5 HZ
f_{pass2}	fréquence au niveau de l'extrémité de la bande passante	630.5 HZ
f_{stop2}	fréquence au niveau du début de la deuxième bande de coupure	631 HZ
Filtre passe-bande 2		
f_{stop2}	fréquence au niveau du début de la deuxième bande de coupure	631 HZ
f_{pass3}	fréquence à la limite du début de la bande passante	631.5 HZ
f_{pass4}	fréquence au niveau de l'extrémité de la bande passante	639 HZ
f_{stop3}	fréquence au niveau du début de la deuxième bande de coupure	639.5 HZ
Filtre passe-bande 3		
f_{stop4}	fréquence au niveau du début de la troisième bande de coupure	639.5 HZ
f_{pas5}	fréquence à la limite du début de la bande passante	640 HZ
f_{pass6}	fréquence au niveau de l'extrémité de la bande passante	649 HZ
f_{stop5}	fréquence au niveau du début de la troisième bande de coupure	650 HZ

Tab. II.3 : Fréquences de coupure pour les trois filtres passe-bande.

II.13.LES RESULTATS D'ESTIMATION

Le tableau suivant présente les valeurs exactes de fréquence PSH et la vitesse mesuré par un tachymètre. Ce tableau présente une comparaison entre les valeurs exactes et celles estimées par la méthode de prony PFG.

Charge	Valeur exacte de fréquence	La vitesse exacte
	PSH1 (HZ)	Nr (tr/min)
0% de la charge	648.2	1496.14
20% de la charge	644.1	1487.35
60% de la charge	634.5	1466.78
100% de la charge	624.8	1446

Tab. II.4 : Les valeurs exactes de fréquence et de la vitesse du moteur 3KW pour différentes charges.

II.13.1. estimation de la fréquence de PSH

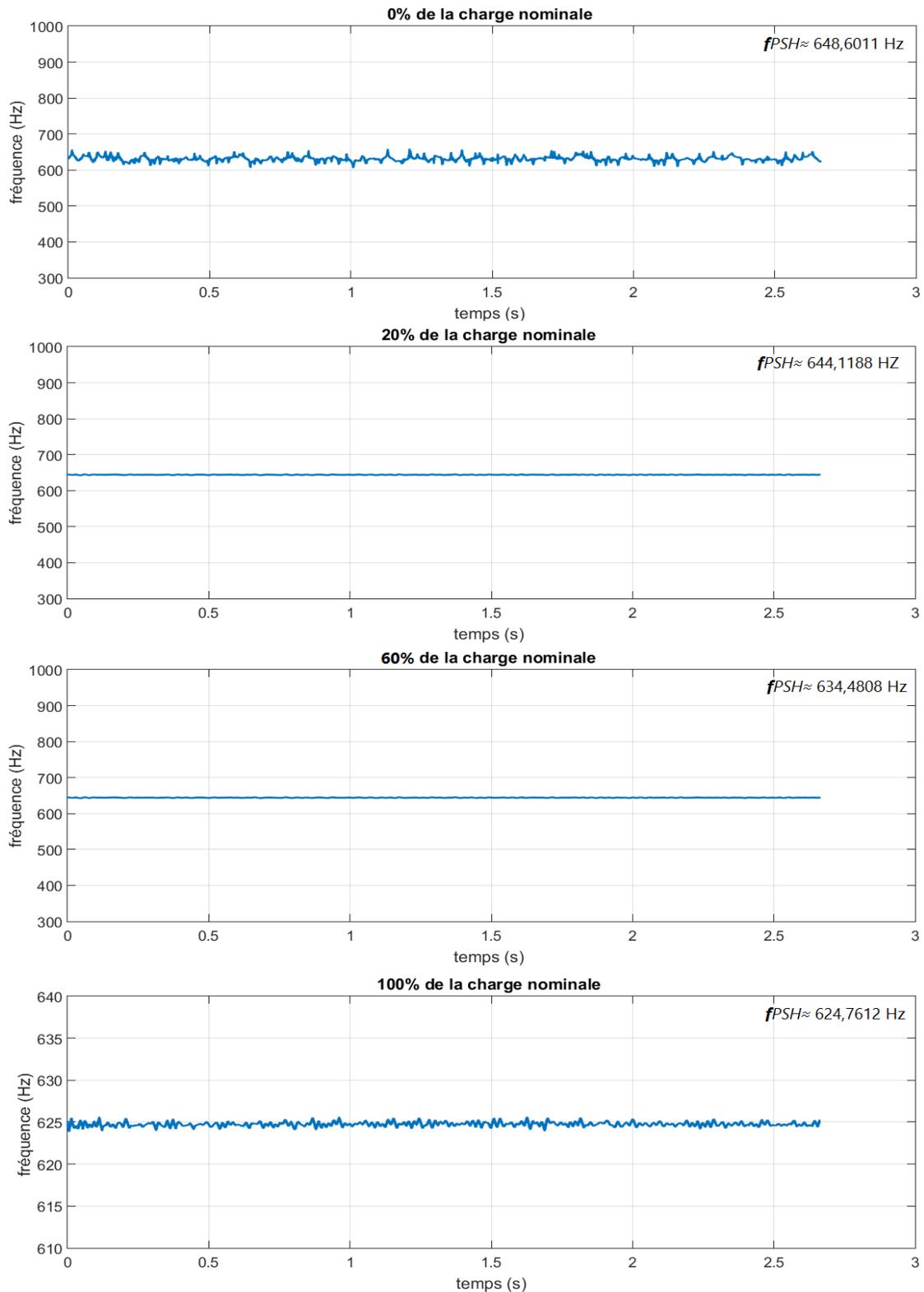


Fig. II.26 : La fréquence du premier PSH estimée par la méthode PFG pour différents charge mécanique.

Les figures II.24 et II.25 représentent la fréquence du PSH estimées par la méthode de PFG. On remarque que l'algorithme suit parfaitement l'évolution et les variations sur la fréquence et l'amplitude pour différents charge mécanique : à vide ,20%, 60% et 100% de la charge nominale.

II.14. LES RESULTATS D'ESTIMATION DE LA VITESSE

Après obtenus la fréquence PSH on peut aller vers l'estimation de la vitesse rotorique :

$$f_{PSH} = f_s - N_b \cdot f_r \quad \longrightarrow \quad f_r = \frac{f_{PSH} + f_s}{N_b} \quad (\text{II.28})$$

Avec f_r est la fréquence de rotation en (Hz). La vitesse de rotation en (tr/min) est obtenir en multipliant f_r par 60 comme suit :

$$N_r = 60 \cdot f_r$$

Les figures II.26, II.27, II.28 et II.29 montrent la vitesse de rotation estimée. D'une manière qualitative, l'algorithme proposé permet de suivre l'évolution de la vitesse durant le temps d'acquisition et les changements de la charge.

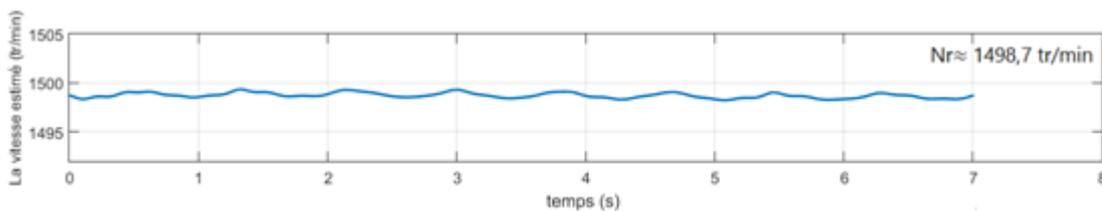


Fig. II.27 : La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à vide.

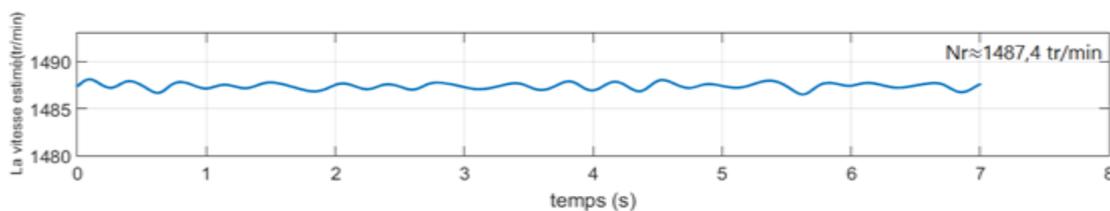


Fig. II.28 : La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à 20% de la charge nominale.

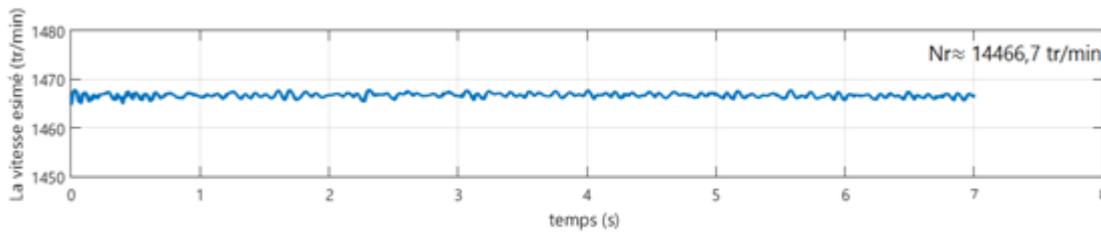


Fig. II.29: La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à 60% de la charge nominale.

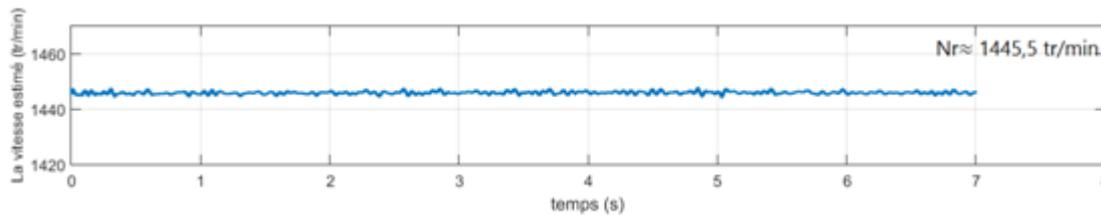


Fig. II.30 : La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à 100% de la charge nominale.

Le tableau montre qu'il existe des erreurs d'estimation mais de très faibles valeurs. On remarque aussi que cette erreur augmente pour les faibles charges. Les erreurs d'estimation sont définies par :

$$E_{vitesse(\%)} = 100 \left(\frac{n_{réel} - n_{estimé}}{n_{réel}} \right) \quad (\text{II.29})$$

La charge	La vitesse estimée (tr/min)	La vitesse réelle (tr/min)	L'erreur (%)
à vide.	1496.14	1498.7	0.1708
20%	1487.35	1487.4	0.0034
60%	1466.35	1467.7	0.0919
100%	1446	1445.5	0.0346

Tab. II.5 : La vitesse réelle et la vitesse estimée par la méthode PFG et l'erreur d'estimation pour différentes charges.

II.14.1. ESTIMATION DE LA VITESSE POUR UN FONCTIONNEMENT NON-STATIONNAIRE

Dans cette partie, on va tester la méthode PFG sur un signal présentant des non-stationnarités causées par des variations brusques de la charge.

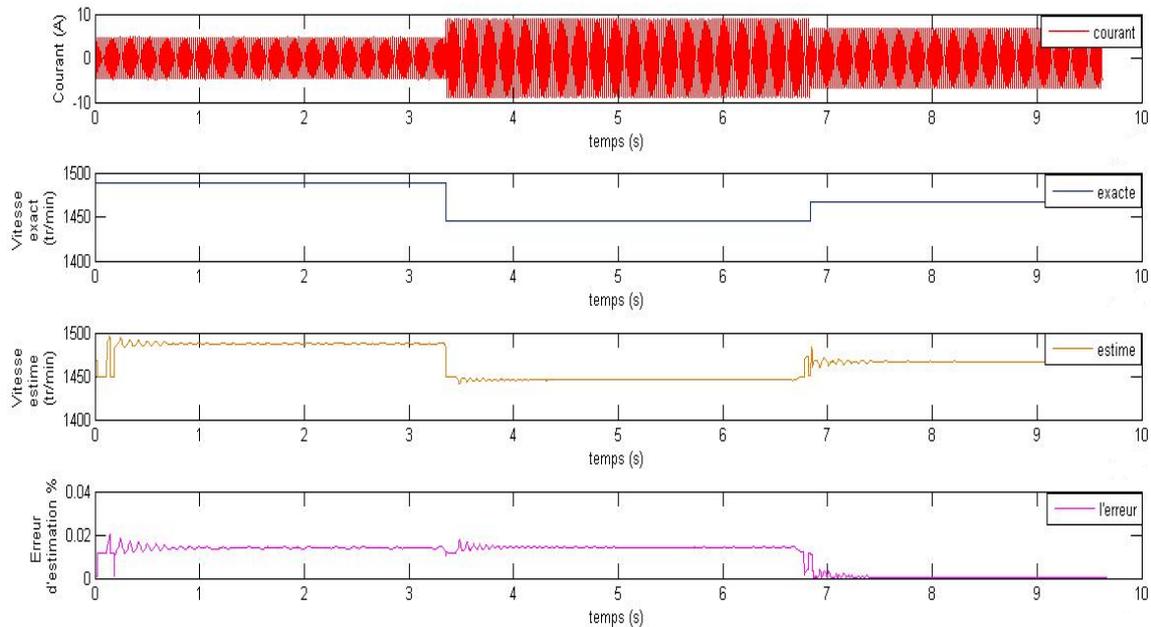


Fig. II.31 : La vitesse estimée par la méthode PFG pour un fonctionnement à 20% puis 100% et 60% de la charge nominale.

L'algorithme commence toujours par l'estimation de la fréquence PSH, ceci permet de calculer la vitesse et tracer son allure. La figure II.30 montre la vitesse de rotation estimée et son erreur. D'une manière qualitative, l'algorithme proposé permet de suivre l'évolution de la vitesse durant les changements de la charge. Du point de vue quantitative, cette figure montre qu'il existe des erreurs d'estimation mais de très faibles valeurs. Il est très clair que l'erreur prend des valeurs significatives durant les périodes transitoires correspondant aux variations de la charge.

D'une manière générale, ces résultats prouvent l'efficacité de la méthode proposée pour estimer et suivre la vitesse du rotor du moteur asynchrone à cage même pour un fonctionnement non stationnaire.

II.15. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons vu une étude théorique qui montre la richesse de spectre du courant statorique en harmoniques. De plus on a défini les familles d'harmoniques existents avec une présentation spectrale par l'application 'FFT' (Fast Fourier transform) fait par un courant réel d'une phase d'un moteur asynchrone. Ceci pour savoir le type d'harmonique qu'il faut choisir afin d'estimer la vitesse rotorique. Dans notre étude on a choisi l'harmonique d'encoches rotorique **RSH** exactement le **PSH** (Principal slot harmonic) en surveillons sa fréquence et leur amplitude comme un critère de choix dans la zone qu'ils situent. Puis on a présenté l'effet de la charge sur la fréquence **PSH** pour savoir les limites de l'intervalle. et nous avons présenté un algorithme basé sur la méthode de Prony qui permet d'estimer et de suivre la vitesse d'un moteur asynchrone à partir du courant statorique. L'algorithme proposé a été soumis à plusieurs tests en utilisant des signaux génériques et réels stationnaires et non stationnaires. Les résultats obtenus sont satisfaisants et prouvent l'efficacité de la méthode.

Chapitre III

étude expérimental pour l'estimation de la vitesse

III.1. INTRODUCTION

La méthode de **PFG** est une amélioration significative de L'algorithme Prony classique. Il permet d'estimer de suivre la vitesse d'un moteur asynchrone en ligne. C'est Donc la méthode choisie pour être utilisée dans cette mémoire.

Pour cette étude, on va estimée la vitesse de la moteur asynchrone triphasée en utilisant le courant d'une seule phase statorique. L'acquisition du courant statorique est son traitement sont effectués a l'aide du logiciel labview.

III.2. DEFINITION

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un logiciel de développement d'applications d'instrumentation. Créé le 1986. Ce logiciel, utilisable dans un grand nombre de domaines, est plus particulièrement destiné à l'acquisition de données et au traitement du signal. En effet, il offre de larges possibilités de communication entre l'ordinateur et le monde physique (par cartes d'acquisitions analogiques ou numériques, cartes GPIB, réseau, liaisons série et parallèles, USB etc.) ainsi que d'importantes bibliothèques mathématiques permettant de réaliser de multiples traitements sur les signaux mesurés.

L'idée de LabVIEW est de remplacer les instruments de mesures et d'analyse d'un laboratoire par un ordinateur muni de cartes spécifiques et d'un logiciel approprié. Dans le cadre de la mesure, les cartes permettent de convertir des signaux électriques provenant de capteurs, en données numériques. Ainsi, un seul ordinateur muni d'une carte d'acquisition analogique et de LabVIEW est capable de remplacer un voltmètre, un fréquencemètre ou un oscilloscope. De plus, on pourra traiter, analyser et archiver sur disque automatiquement les mesures effectuées.

Ce langage, disponible sous de nombreuses plates-formes (Windows, Linux, PDA) permet de mettre au point rapidement des instruments de mesures. Particulièrement destiné au monde industriel, c'est un langage de très haut niveau s'appuyant sur une machine virtuelle et qui rend

Accessible la programmation à un public non spécialiste, ce qui peut entraîner des difficultés de maintenance d'un code de ce type.

Etant donné que LabVIEW possède la capacité de communiquer avec des périphériques externes, il peut donc naturellement servir à envoyer des données vers ces périphériques afin de les contrôler (un robot par exemple) même si ce n'est pas son objectif premier [IGM].



Fig.III.1 : Banc d'essais expérimental pour l'estimation de la vitesse.

Pour atteindre l'objectif d'estimation de la vitesse, le LabVIEW peut nous aider pour l'application de notre Algorithme d'une façon sophistiqué c'est-à-dire il nous donne la possibilité de suivi l'évolution de la vitesse en temps réel. Ceci fait par une série des outils d'instrumentation intégré sur ce logiciel. Les équipements utilisés sont :

- **Moteur 3 kW, 4 pôles, 28 barres rotoriques**
- **Alimentation en tension réglable**
- **Capteur de courant à effet Hall**
- **Carte d'acquisition NI9215**
- **PC Supervision**
- **Une alimentation a courant continu**
- **charge résistive variable**
- **génératrice tachymétrique**
- **multimètre**

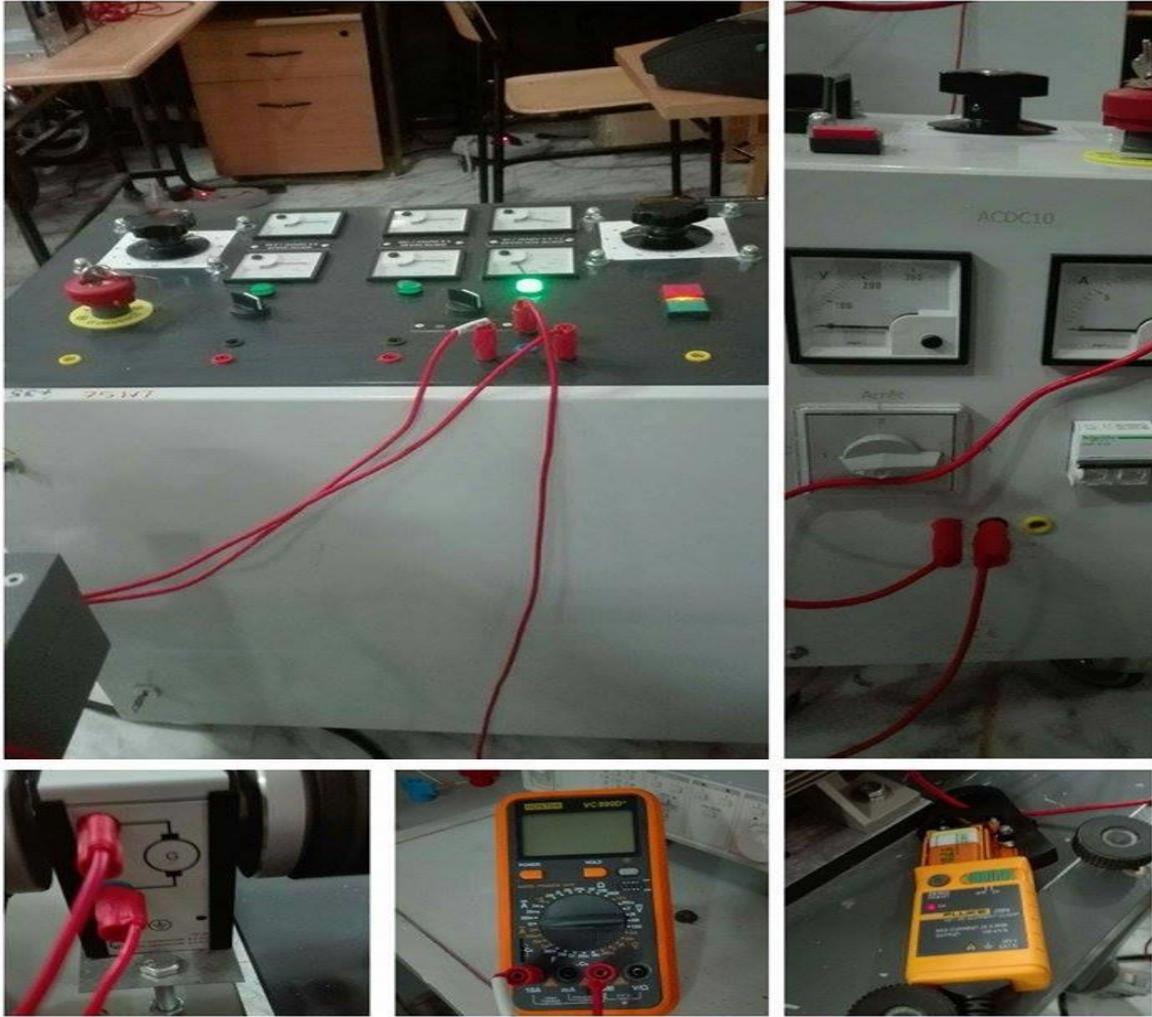


Fig.III.2 : Description des matériels utilisés pour l'acquisition du signal.

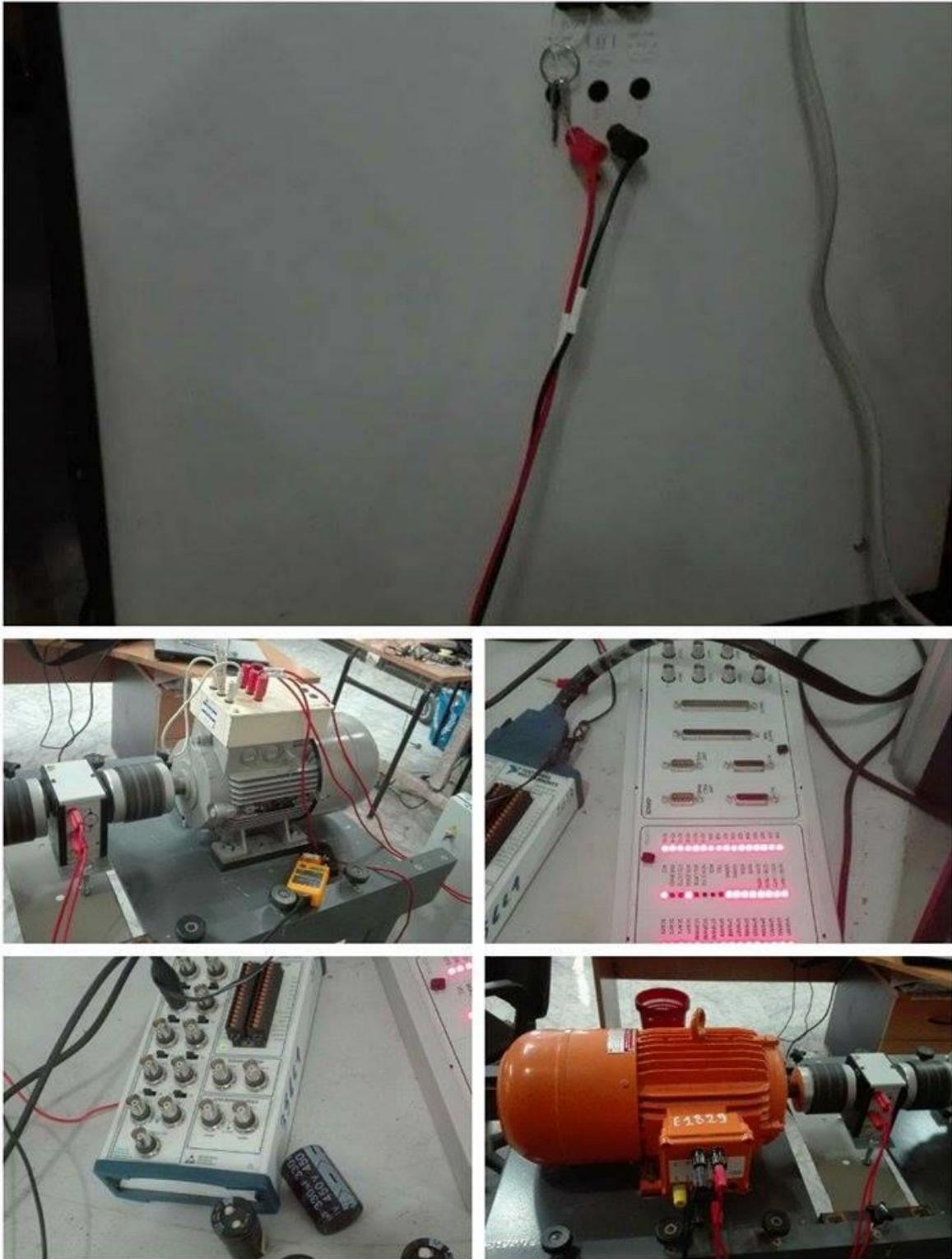


Fig.III.3 : Description des matériels utilisés pour l'acquisition du signal.

III.3. DESCRIPTION DE BANC D'ESSAI

Les essais expérimentaux ont été effectués au sein du Laboratoire de modélisation du système énergétique (LMSE). Le moteur asynchrone triphasé à cage utilisé dans nos expérimentations est un moteur tétra polaire de 3 kW. Le stator est constitué de 48 encoches alors que le rotor se compose de 28 barres en Aluminium.

Les caractéristiques de moteur sont présentées sur le Tableau II.1

Caractéristiques	Moteur asynchrone triphasés
La puissance	3 KW
La vitesse nominale	1430 tr/min
La tension nominale	380 V
Le courant nominal	6. 10A
Nombre de barres rotoriques	28

Tab.III.1 : Les Caractéristiques de la machine utilisée.

Le moteur a été couplé en étoile sans neutre et fonctionnait à vide, à 10% de la charge, à 25% de la charge et à 45% de la charge.

La figure II.2 montre les allures de courant de la phase a pour les différents régimes de charge. Il est clair que ces allures aient des formes sinusoïdales.

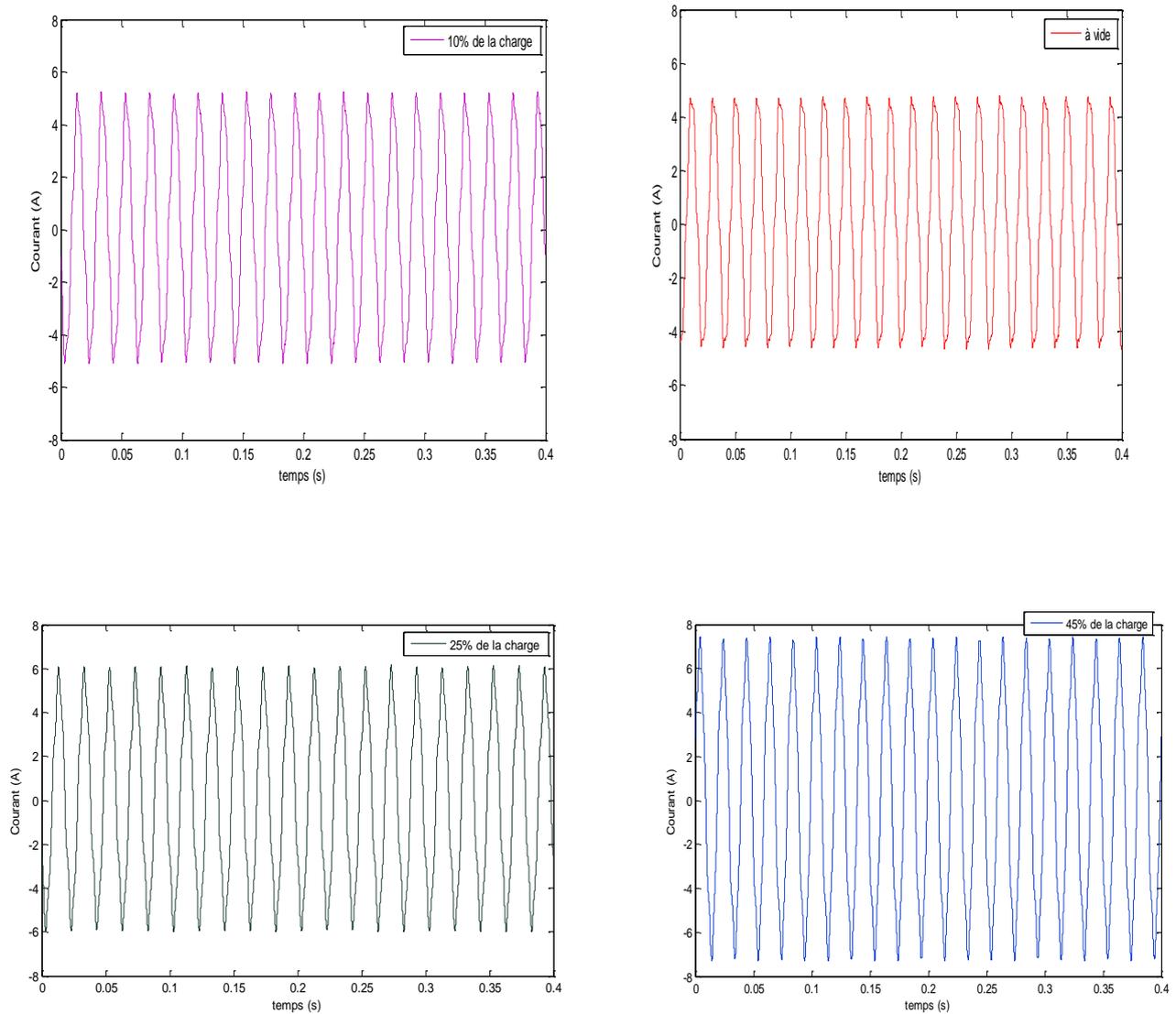
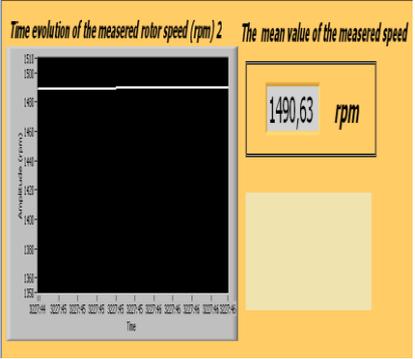
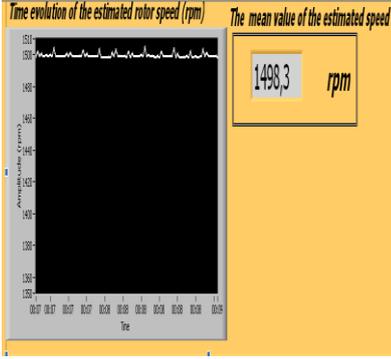
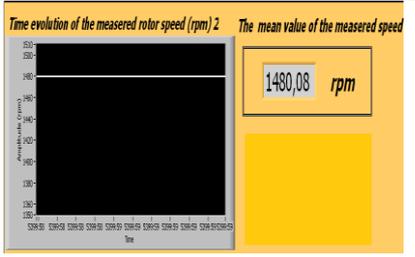
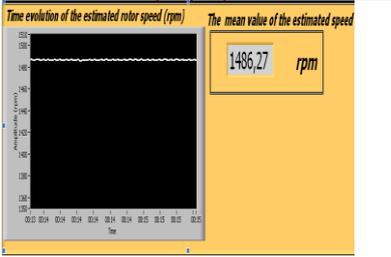
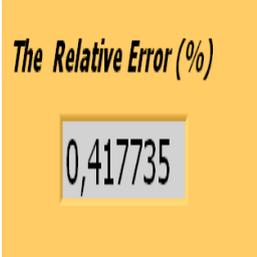
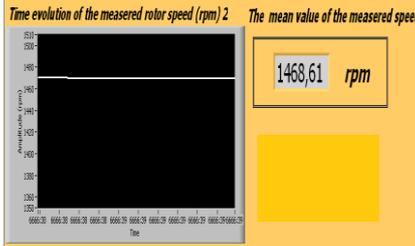
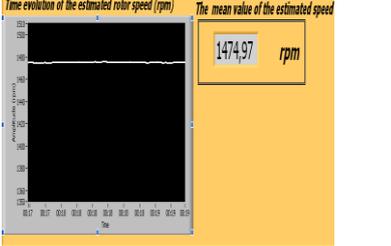
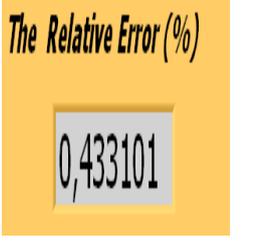
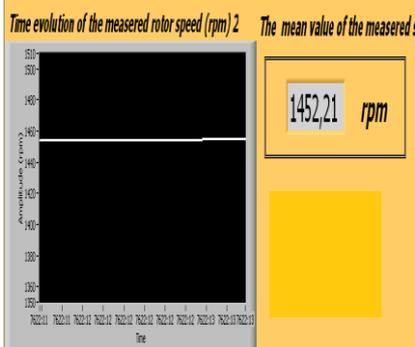
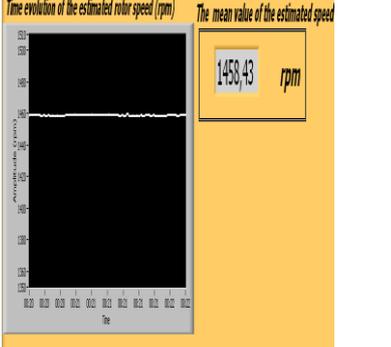
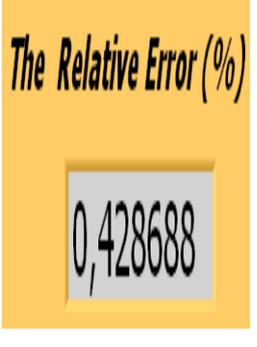


Fig.III.4 :L'évolution temporelle de courant de la phase **a** avec différentes charges.

III.4 RESULTATS EXPERIMENTAUX

Charge	Vitesse mesuré (tr/min)	Vitesse estimé (tr/min)	erreur (%)
A vide			
10%			
25%			
45%			

Tab. III.2 : Comparaisons entre la vitesse estimée et la vitesse mesurée.

Le tableau suivant présente les Comparaisons entre la vitesse estimée par la méthode de Prony et la vitesse mesurée par un capteur de vitesse. Qualitativement, ces figures montrent une grande similarité entre la vitesse estimée et celle mesurée. Quantitativement, on remarque que l'erreur relative est très petite dans tous les régimes de fonctionnement. Ces résultats

prouvent l'efficacité de la méthode proposée pour l'estimation de la vitesse des moteurs asynchrones à cage.

Time evolution of the estimated rotor speed (rpm)

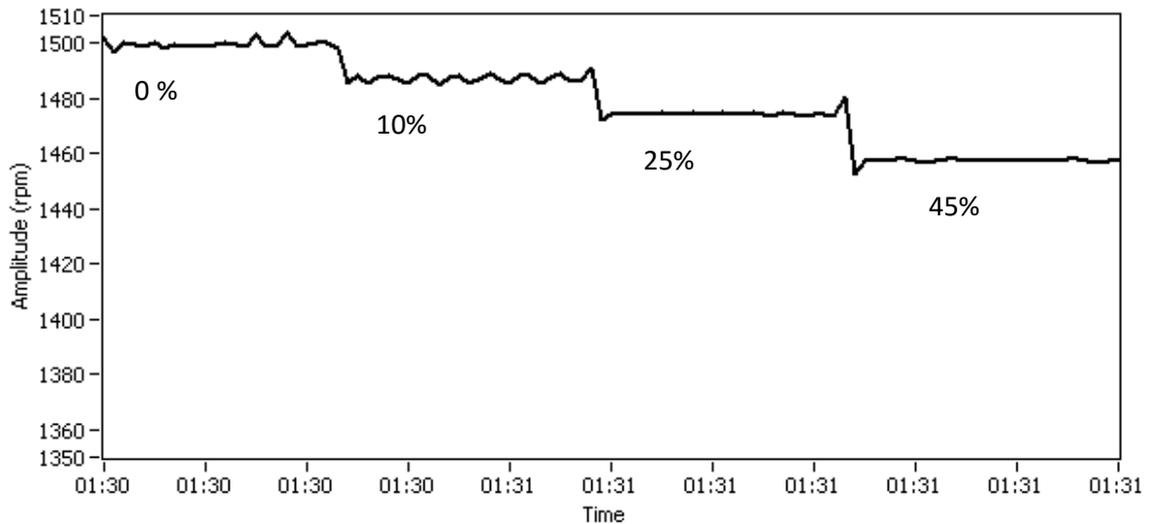


Fig. III.5 : Estimation en ligne de la vitesse durant des changements brusques dans la Charge.

De plus, l'algorithme proposé a été testé pour l'estimation de la vitesse en présence d'une non stationarité due à une variation brusque de la charge. La (Fig. III.5) présente la vitesse estimée pour un moteur fonctionnant à vide puis, à des instants donnés on varie brusquement la charge vers 10% 25% et 45%. La figure obtenue montre clairement l'aptitude de l'algorithme de Prony à estimer et à suivre la vitesse de rotation même en présence d'une variation dans le régime de fonctionnement.

III.5.CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté un algorithme basé sur la méthode de prony qui permet d'estimer et de suivre la vitesse d'un moteur asynchrone à partir du courant statorique. L'algorithme proposé a été subit à plusieurs tests en utilisant des signaux réels. Les résultats obtenus sont satisfaisants et prouvent l'efficacité de la méthode.

De plus, on a implanté l'algorithme proposé sur l'environnement de LabVIEW afin d'estimer la vitesse en ligne.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Après avoir dressé un état de l'art sur la machine asynchrone à cage, nous avons exploré les différentes approches d'estimation de la vitesse des moteurs asynchrones. Nous avons, dans un premier chapitre, rappelé les éléments de constitution de la machine et précisé les différentes approches d'estimation de la vitesse, tout en concentrant sur celles appartenant à l'approche signal (Analyse Spectrale du Courant Statorique).

Dans le deuxième chapitre, nous avons appliqué cette méthode au courant statorique et exploré leur contenu spectral par un programme MATLAB. On aura quatre familles harmoniques HT, RSH, EFH et RBFH les dernier trois harmoniques à une relation entre la vitesse de rotation nous étudions sur l'harmonique des encoches rotoriques (RSH) parce qu'il contient le principale encoches rotoriques (PSH) et ce dernier nous donnons une bonne estimation de vitesse Et les résultats d'application de l'algorithme proposé (PFG) qui permet d'estimer et de suivre l'évolution de la vitesse d'un moteur asynchrone à cage.

Dans le troisième chapitre on a implanté l'algorithme proposé sous l'environnement LabVIEW. Plusieurs tests on été effectués afin d'estimer la vitesse en ligne. Les résultats obtenus illustrés dans ce chapitre, prouvent l'efficacité de l'algorithme proposé.

D'après de ce que nous avons vu sur l'algorithme de prony on remarque qu'il y a des limites que présente des contraintes direct pour faire une estimation de la vitesse, on peut les considérés comme des inconvénients sur notre algorithme et on peut les citer comme suit : premièrement le temps d'acquisition de notre algorithme prend un grand temps tel que $t_A=0.2s$. Pour cela nous n'avons pas arrivé à estimer la vitesse dans un temps réel par rapport à une capture de vitesse, et par conséquent nous ne pouvons pas appliquer cette technique dans un system commandé. Deuxièmes, notre l'algorithme nécessite des informations supplémentaires sur le moteur utilisé pour faire cette estimation : d'un Côte le nombre de paires de pole, et de l'autre Côte les nombres des barres rotoriques que sont parfois inconnue.

Le perspective de ce travail c'est comment nous portons La possibilité de généralisé algorithme proposé pour estimer la vitesse des moteurs asynchrone des différents paramètres aussi d'améliorer cet algorithme pour l'utiliser dans le domaine de commande des machines.

Bibliographie

[AGR 16]: AGRAINE ELHACENE, «Estimation de la vitesse d'un moteur asynchrone par la methode de prony» *Mémoire de master, Université de Mohamed Khaider-Biskra, Faculté des sciences de technologie département d'électrotechnique, (2016).*

[DID04]:DIDIER, Gaëtan, «Modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances», *Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, (2004).*

[OND 06]:Ondel O «Diagnostic par reconnaissance des formes : Application a un ensemble convertisseur – machine asynchrone» *Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France, (2006).*

[DJE07]: Djebala, N.Ouellaa, N.Hamzaoui et S.Guenfoud, «Application de la transformée en Ondelettes Discrète Dans la Détection des défauts de roulements», *Laboratoire de Mécanique et Structures, Article de conférence, Université de GUELMA, (2007).*

[ABL09]: Abl Bouguerne «Diagnostic automatique des défauts des moteurs asynchrones» *Mémoire de magister, Université Mentouri – Constantine, Faculté des sciences de l'ingénieur département d'électrotechnique, (2009).*

[KSZ08]:K. Szabat, T. Orłowska-Kowalska, «Performance Improvement of Industrial Drives with Mechanical Elasticity using Nonlinear Adaptive Kalman Filter» *IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55 No. 3, 1075-1084, (2008).*

[JMA00]: J. Maes, J.A. Melkebeek «Speed-sensorless direct torque control of induction motors using an adaptive flux observer» *IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 36, no.3, pp. 778–785,(2000).*

[OKE13]: O. Keysan, and H. B. Ertan, «Real-Time Speed and Position Estimation Using Rotor Slot Harmonics» *IEEE Trans. Ind. Info.* Vol. 9, no. 2, pp. 899–908, (2013).

[MAI05]: AIELLO, Massimo, CATALIOTTI, Antonio, et NUCCIO «Salvatore. An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform. *Instrumentation and Measurement» IEEE Transactions on,* vol. 54, no 5, p. 1811-1819, (2005).

[CHN10]: CHEN, Shuo et ŽIVANOVIĆ, Rastko «Estimation of frequency components in stator current for the detection of broken rotor bars in induction machines» *Measurement,* vol. 43, no 7, p. 887-900, (2010).

[SAH15]: SAHRAOUI, Mohamed, MARQUES CARDOSO, Antonio J., et GHOGGAL Adel, «The Use of a Modified Prony Method to Track the Broken Rotor Bar Characteristic Frequencies and Amplitudes in Three-Phase Induction Motors» *Industry Applications, IEEE Transactions on,* vol. 51, no 3, p. 2136-2147, (2015).

[IGM]:www-igm.univ-mlv.fr[01/05/2017, 20:30H].