



HAL
open science

Contribution à l'application des capteurs en technologie MEMS pour la commande sans fils des actionneurs électriques

Ibtissem Akacha Helal

► **To cite this version:**

Ibtissem Akacha Helal. Contribution à l'application des capteurs en technologie MEMS pour la commande sans fils des actionneurs électriques. Autre. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2016. Français. NNT : 2016INPT0127 . tel-04261757

HAL Id: tel-04261757

<https://theses.hal.science/tel-04261757>

Submitted on 27 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Génie Electrique

Présentée et soutenue par :

Mme IBTISSEM AKACHA HELAL

le jeudi 8 décembre 2016

Titre :

CONTRIBUTION A L'APPLICATION DES CAPTEURS EN
TECHNOLOGIE MEMS POUR LA COMMANDE SANS FILS DES
ACTIONNEURS ELECTRIQUES

Ecole doctorale :

Génie Electrique, Electronique, Télécommunications (GEET)

Unité de recherche :

Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie (LAPLACE)

Directeur(s) de Thèse :

MME MARIA PIETRZAK-DAVID

MME NAJIBA MRABET-BELLAJ

Rapporteurs :

M. FETHI CHOUBANI, ECOLE SUP. DES COMMUNICATIONS DE TUNIS

M. MOHAMED EL HACHEMI BENBOUZID, UNIVERSITE DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Membre(s) du jury :

Mme ILHEM SLAMA-BELKHODJA, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS, Président

M. JACQUES DAVID, INP TOULOUSE, Membre

Mme MARIA PIETRZAK-DAVID, INP TOULOUSE, Membre

Mme NAJIBA MRABET-BELLAJ, ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS, Membre

M. MOHAMED BOUSALEM, THALES, Membre

M. TAN HOA VUONG, INP TOULOUSE, Membre

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Tunis El Manar
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis
Année Universitaire 2015-2016



THESE

Présentée pour obtenir le titre de

Docteur de

Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis

Spécialité : **Génie Électrique**

Ibtissem AKACHA HELAL

*CONTRIBUTION A L'APPLICATION DES CAPTEURS EN
TECHNOLOGIE MEMS POUR LA COMMANDE SANS FILS DES
ACTIONNEURS ELECTRIQUES*

Soutenu le 8/12/2016 devant le jury composé de

- Président : Mme Ilhem SLAMA-BELKHODJA, Professeur à l'ENIT de Tunis
- Rapporteur : M. Mohamed El Hachemi BENBOUZID, Professeur à l'UBO, Brest
- Rapporteur : M. Fethi CHOUBANI, Professeur à SupCom, de Tunis
- Examineurs : M. Mohamed BOUSALEM, Dr, THALES, Recherche Développement
- Directeurs de thèse : Mme Najiba MRABET-BELAAJ, Professeur à l'ISI de Tunis
Mme Maria PIETRZAK-DAVID, Professeur à l'INP de Toulouse
M. Jacques DAVID, Professeur à l'INP de Toulouse
M. Tan-Hoa VUONG, IR-HDR à l'INP de Toulouse

Cette thèse a été effectuée au Laboratoire des Systèmes Électriques de l'ENIT (L.S.E.- LR 11 ES 15), Tunisie, en cotutelle avec LAPLACE-ENSEEIH-INT

Avant-propos

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre d'une cotutelle internationale entre l'Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT) en France et l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, en Tunisie.

Je remercie les responsables du Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie, LAPLACE, UMR N° 5213, **M. Thierry LEBEY**, Directeur de Recherche au CNRS, Directeur du LAPLACE, **M. Maurice FADEL**, Professeur à l'INPT et précédent Directeur Adjoint du LAPLACE, **M. Philippe LADOUX** Directeur Adjoint suivant d'avoir bien voulu m'accueillir pendant mes séjours en France sur le site de l'École Nationale Supérieure d'Electrotechnique, d'Electronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications, ENSEEIHT, à Toulouse.

Je tiens tout particulièrement à remercier:

Mme Ilhem SLAMA BELKODJA, Professeur à l'Ecole d'Ingénieurs de Tunis, en Tunisie qui a accepté de présider mon jury de thèse malgré ses nombreuses responsabilités et engagements.

M. Fethi CHOUBANI, Professeur à SUP'COM de Tunis qui a bien voulu évaluer mes travaux de thèse en tant que rapporteur et expert scientifique dans le domaine des Radiofréquences (RF), de la Compatibilité Electromagnétique et des Objets Communicants.

M. Mohamed BENBOUZID, Professeur à l'Université Occidentale de Bretagne, pour son travail de rapporteur et le regard du spécialiste de Génie Electrique dans ce monde des « Smarts Objets ».

M. Mohamed BOUSALEM, Docteur et Ingénieur de Recherche chez THALES qui a bien voulu porter une appréciation industrielle RF sur mes travaux de thèse en acceptant d'être un examinateur de ce jury.

Mme Maria PIETRZAK-DAVID, Professeur à l'INPT-ENSEEIHT, chercheur du groupe CODIASE pour avoir accepté la Direction de mes travaux de recherche et pour ses qualités humaines et ses précieux conseils. Je la remercie aussi pour la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant et en organisant mon accueil au sein du LAPLACE.

M^{me} Najiba MRABET BELLAJ, Professeur à l'ISI-Tunis pour la direction tunisienne de ces travaux de recherche. Ses qualités humaines, sa confiance en et ses conseils m'ont permis de m'accrocher et de mener à bien cette thèse.

M. Jacques DAVID, Professeur à l'INPT-ENSEEIHT, membre de groupe GRE au LAPLACE pour la Codirection française de cette thèse, en tant que le précurseur de cette thématique de recherche et l'initiateur de la coopération scientifique intergroupe CODIASE-GRE. Il a su me rassurer et donner de multiples conseils scientifiques dans le domaine des RF.

M. Tan-Hoa VUONG, HDR, Ingénieur de Recherche à l'INPT- ENSEEIHT et Responsable de l'Antenne CNAM à Toulouse, pour les idées fructueuses et quotidiennes qui ont enrichi mes connaissances. Ses compétences dans le domaine de la conception des Softwares et Hardware ont permis de mener à terme mes recherches. J'ai apprécié le temps qu'il m'a consacré pour superviser tout particulièrement les délicates phases expérimentales et de mise au point des systèmes étudiés. J'ai été particulièrement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail.

Je tiens à remercier aussi :

M. Pascal MAUSSION, Responsable de groupe CODIASE pour m'avoir chaleureusement accueilli dans cette équipe de recherche.

Mmes Valérie SCHWARZ, Responsable du Service Comptabilité, **Carine ALIBERT**, Service Missions, **Catherine MOLL-MAZELLA**, Service Comptabilité et **Jessica TOSCANO**, Accueil et Gestion du Personnel, Documentation / Bibliothèque au LAPLACE pour leur gentillesse, aide, efficacité et conseils administratifs.

M. Olivier DURRIEU, Responsable Technique de l'Equipe CODIASE, pour son aide constante et sa réactivité remarquable qui ont permis de mener à bien cette étude.

M. Jacques BENAIOUN, Responsable de l'Informatique sur le site ENSEEIHT du LAPLACE pour sa disponibilité, son efficacité et son aide constante tout au long de mon séjour au LAPLACE.

Un grand merci à mon cher mari *Mekki* et à mes filles *Tayssir et Yomna* pour leur patience, sacrifice, soutien et amour.

Qu'ils soient remerciés également: *ma mère, ma belle-mère, et mon beau-père*, pour leur inestimable aide quotidienne et tous les sacrifices faits pour moi. Croyez-moi que sans vous ce travail n'arriverait jamais à terme. Je n'oublierais jamais le soutien de mes sœurs *Mouna et Sameh* et de mon frère *Mohamed Ali*. En ce moment, je pense tendrement à mon père *Hosni* qui serait très fier de moi, mais qui nous a quittés bien trop tôt.

Je voudrais dire grand merci à mes très chers amis *Amine et Meriem*, pour leur aide, leur patience et leur accueil à Toulouse. Je ne pourrais jamais leur rendre ce qu'ils m'ont offert en m'accueillant sous leur toit. Un remerciement assez spécial j'adresse à toi ma chère *Ines*, tu étais plus qu'une sœur pour moi...

Mes remerciements vont également à *M. Khaled, Mme Dekhra* et leurs filles *Donia, Dorra et Sirine*. Merci à ma chère *Amel* pour ton aide.

J'adresse également mes remerciements à tous mes amis au Laboratoire des Systèmes Electriques à Tunis : *Asma, Ines, Sameh, Ikram, Najla, Toumia, Zina, Imed, Ahlem*,

Manef, Hanen, Malek, Amine, Chiraz et aussi au LAPLACE Meriem, Clément, Antoine, Rania, Satafa, Mouna, Sawsan et Phok.

Sommaire

RESUME	XIII
ABSTRACT	XV
PUBLICATIONS	XVII
LISTE DES FIGURES	XIX
LISTE DES TABLEAUX	XXVII
GLOSSAIRE	XXIX
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : METHODES DE MESURE DE LA VITESSE DE ROTATION D'UN ACTIONNEUR ELECTRIQUE	5
1.1. INTRODUCTION	9
1.2. INTERET DE LA MESURE DE LA VITESSE	9
1.3. LES METHODES CLASSIQUES DE DETERMINATION DE LA VITESSE D'UN ACTIONNEUR TOURNANT	10
1.3.1. Méthodes directes de mesure de vitesse.....	11
1.3.1.1. Les Résolveurs	11
1.3.1.2. Les Codeurs optiques	13
1.3.1.2.1. Codeur incrémental	14
1.3.1.2.2. Codeurs absolus	16
1.3.1.3. Génératrices tachymétriques	18
1.3.2. Méthodes indirectes	18
1.3.2.1. Généralités	18
1.3.2.2. Approches fondées sur le modèle dynamique de la machine	19
1.3.2.3. Les Techniques basées sur les méthodes de traitement de signal.....	22
1.4. METHODE PROPOSEE POUR LA DETERMINATION DE LA VITESSE DANS UNE APPLICATION EMBARQUEE	23
1.5. CONCLUSION.....	24
CHAPITRE 2 : NOUVELLE APPROCHE POUR LA MESURE DE LA VITESSE DE ROTATION IN SITU D'UNE MACHINE ELECTRIQUE TOURNANTE	25
2.1. INTRODUCTION	29

2.2. GENERALITES SUR LES MICROSYSTEMES ELECTROMECHANIQUES (MEMS).....	30
2.2.1. Introduction	30
2.2.2. Historique.....	30
2.3. MARCHE DES MEMS.....	31
2.4. ACCELEROMETRES EN TECHNOLOGIE (MEMS).....	31
2.5. PROCEDURE DE FABRICATION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ...	32
2.5.1. Modélisation mécanique.....	33
2.5.2. Schéma synoptique du capteur	34
2.6. DETERMINATION DE L'ANGLE DE DEVIATION DE L'ACCELEROMETRE EN TECHNOLOGIE MEMS.....	38
2.7. PRINCIPE DE DETERMINATION DE LA VITESSE AVEC DES ACCELEROMETRES EN TECHNOLOGIE MEMS.....	39
2.7.1. Redondance matérielle des accéléromètres MEMS.....	39
2.7.1.1. Etude théorique	39
2.7.1.2. Résultats de simulation.....	43
2.7.1.2.1. Fonctionnement à vitesse constante	44
2.7.1.2.2. Fonctionnement à vitesse variable.....	46
2.7.1.3. Etude expérimentale	47
2.7.1.3.1. Acquisitions des données	47
2.7.1.3.2. Localisation des capteurs.....	48
2.7.1.3.3. Calibrage.....	48
2.7.1.3.4. Détermination de la vitesse	49
2.7.2. Utilisation de la variance d'Allan pour la détermination de la vitesse	50
2.7.2.1. Variance d'Allan.....	50
2.7.2.2. Corrélacion entre la variance d'Allan et la vitesse de rotation	52
2.8. CONCLUSION.....	53
CHAPITRE 3 : PROBLEMATIQUES LIEES AUX ACCELEROMETRES MEMS ET SOLUTIONS ENVISAGEES.....	55
3.1. INTRODUCTION	59
3.2. PROBLEMATIQUE D'UTILISATION DES ACCELEROMETRES EN TECHNOLOGIE MEMS DANS LES MACHINES ELECTRIQUES.....	60
3.2.1. Evolutions temporelles des signaux délivrés par les accéléromètres	60
3.2.2. Evolution fréquentielle des signaux (analyse FFT)	62
3.2.3. Evolution de la densité de probabilité statistique des signaux	62

3.3. RECONSTRUCTION D'UN SIGNAL DE REFERENCE	64
3.3.1. Reconstitution d'un signal de référence par une simple moyenne des signaux : Première approche.....	65
3.3.2. Reconstitution d'un signal de référence par la méthode de la variance d'Allan utilisant la technique AG : Deuxième approche	66
3.3.2.1. Les Algorithmes Génétiques.....	66
3.3.2.1.1. Principe de fonctionnement.....	67
3.3.2.1.2. La reproduction	68
3.3.2.1.3. Le croisement	68
3.3.2.1.4. La mutation.....	68
3.3.2.1.5. La convergence	69
3.3.2.2. Principe de la méthode proposée.....	69
3.3.2.3. Résultats de reconstruction.....	70
3.3.3. Méthode de reconstruction du signal d'accélération à base des AG et sous différents critères de performances : troisième approche.....	72
3.3.3.1. Principe de la méthode	72
3.3.3.2. Vérification de l'algorithme d'optimisation utilisée.....	73
3.3.4. Stratégie de reconstruction basée sur les critères de performances.....	75
3.3.4.1. Critères de performance des signaux des capteurs	76
3.3.4.2. Définition de la fonction coût.....	76
3.3.4.3. Résultats expérimentaux.....	77
3.3.4.3.1. Signal de référence pour une vitesse $\Omega_1 = \Omega$ rad/s.....	77
3.3.4.3.2. Reconstruction du signal de référence pour $3\Omega_1 = 3\Omega$ rad/s	82
3.3.4.3.3. Reconstruction du signal de référence pour $7\Omega_1 = 7\Omega$ rad/s	83
3.3.4.3.4. Catalogue des signaux de référence	85
3.4. CONCLUSION	86

CHAPITRE 4 : TECHNOLOGIE SANS FILS AU SERVICE DE LA SURVEILLANCE ET DU CONTROLE D'UN ACTIONNEUR TOURNANT..... 87

4.1. INTRODUCTION	93
4.2. GENERALITE SUR LA PROPAGATION	94
4.2.1. Propagation dans l' espace libre.....	95
4.2.2. Propagation par trajets multiples.....	96
4.2.3. Variation du canal de propagation.....	96
4.2.3.1. Sélectivité spatiale.....	97
4.2.3.2. Sélectivité fréquentielle.....	97
4.2.3.3. Effet Doppler.....	98

4.2.4.	Problématique de propagation dans un système électrique tournant et Facteurs intervenant dans la propagation dans un environnement en rotation.....	98
4.3.	DESCRIPTION DU SYSTEME PROPOSE.....	100
4.4.	CHOIX DE LA BANDE PASSANTE ET DU PROTOCOLE DE COMMUNICATION	102
4.5.	ETUDE EXPERIMENTALE	104
4.5.1.	Mise en place du dispositif expérimental.....	104
4.5.2.	L'Accéléromètre ADXL203	104
4.5.3.	Carte Arduino Uno.....	104
4.5.4.	L'émetteur ESP8266	105
4.5.5.	Synoptique de la boucle de transmission	105
4.5.6.	Procédure de récupération des données issues de l'ESP8266	107
4.6.	MISE EN PLACE D'UN DISPOSITIF SANS FILS DANS UNE MACHINE TOURNANTE.....	108
4.7.	EVOLUTION DE LA VARIANCE D'ALLAN RELATIVE AUX ACCELERATIONS SANS FILS VIS-A-VIS DE LA VITESSE DE ROTATION DU MOTEUR.....	110
4.7.1.	Variance d'Allan à vitesse constante	110
4.7.2.	Evolution de la variance d'Allan pour des multiples valeurs de vitesse.....	111
4.8.	DETERMINATION DE LA VITESSE DE ROTATION D'UNE MCC A BASE DES CAPTEURS SANS FILS.....	112
4.9.	RECONSTRUCTION DU SIGNAL D'ACCELERATION DE REFERENCE....	114
4.9.1.	Choix des critères de performances	116
4.9.2.	Reconstruction d'accélération d'une vitesse 27rad/s	117
4.9.3.	Reconstruction d'accélération d'une vitesse de 33 rad/s	119
4.9.4.	Reconstruction d'accélération d'une vitesse de 39 rad/s	119
4.9.5.	Génération des signaux de références.....	120
4.10.	CONCLUSION.....	120
CHAPITRE 5 : DETECTION DES VIBRATIONS DU ROTOR D'UN ACTIONNEUR TOURNANT.....		121
5.1.	INTRODUCTION	125
5.2.	FAISABILITE D'UN AUTOPILOTAGE DE LA MACHINE ASYNCHRONE PAR CAPTEUR MEMS SANS FILS.....	125
5.2.1.	Corrélation entre la vitesse et la variance d'Allan	127
5.2.1.1.	Vitesse fixe.....	127

5.2.1.2.	Vitesse variable	128
5.2.2.	Effet des emplacements des capteurs sur la qualité du signal transmis	131
5.2.2.1.	Cas 1 : capteur placé à une distance D1 par rapport à l'axe de rotation	131
5.2.2.2.	Cas 2 : capteur placé à une distance D2 par rapport à l'axe de rotation	132
5.2.2.3.	Comparaison	133
5.2.3.	Effet de la présence du capot sur la qualité de transmission	133
5.3.	INTERET DE LA SURVEILLANCE DES VIBRATIONS	135
5.4.	LIMITES DES SOLUTIONS FILAIRES EXISTANTES	135
5.5.	SURVEILLANCE SANS FILS DES VIBRATIONS	136
5.5.1.	Effet des vibrations sur l'évolution temporelle et spectrale du signal d'accélération	137
5.5.2.	Effet d'injection des vibrations sur l'accélération	138
5.5.3.	Variation des amplitudes des vibrations injectées	142
5.5.4.	Réponse des capteurs suite à une variation de la vitesse de rotation et une injection des vibrations	143
5.6.	DEVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE HOMME MACHINE POUR LE SUIVI DES SIGNAUX DE VIBRATIONS	145
5.6.1.	Initialisation des ports	146
5.6.2.	Récupération des données.....	147
5.6.3.	Fermeture de la connexion	147
5.6.4.	Visualisation des résultats	147
5.7.	CONCLUSION.....	148
	CONCLUSION GENERALE	149
	ANNEXE (A) IDENTIFICATION PARAMETRIQUE DE LA MACHINE MAS PAR AG.....	153
	ANNEXE (B) REALISATIONS EXPERIMENTALES ET TYPONS	159
	ANNEXE (C) PROGRAMME DE L'IHM DEVELOPPE SUR LABVIEW	161
	REFERENCES	169

RÉSUMÉ

Ces travaux de recherche s'inscrivent dans le cadre d'une coopération scientifique entre le Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie (LAPLACE) à l'Institut National Polytechnique de Toulouse en France et le Laboratoire des Systèmes Électriques (LSE) de l'École Nationale d'Ingénieurs de Tunis en Tunisie. L'objectif principal de cette étude consiste à proposer une structure de « smart-machines » en vue de l'intégrer dans un réseau de systèmes supervisés et pilotés à distance. A cette fin, nous développons de nouveaux types de capteurs embarqués intelligents et autonomes pour assurer à la fois la supervision et le contrôle des actionneurs électriques tournants. Les différentes contraintes, comme les dimensions, la mesure in situ (directement sur le rotor de ces machines), la robustesse de ces capteurs dans un milieu à forts champs électromagnétiques, et aussi le faible coût du produit ont orienté notre choix vers les accéléromètres en technologie MEMS (Micro Système Electro Mécanique). Ces composants présentent plusieurs avantages, d'une part par leurs faibles dimensions, et d'autre part par leurs faibles consommations d'énergie. De plus, de par leurs conceptions, les tensions électriques issues des différentes sorties de ces composants sont proportionnelles à des déplacements de petites masses, qui nécessitent la mise en place de différents algorithmes de traitement du signal afin d'extraire la vitesse de rotation de ces actionneurs. Cela nous a conduits à employer la variance d'Allan et des algorithmes génétiques pour obtenir la meilleure qualité des mesures données par ces capteurs. Dans la première partie, nous développons une maquette de mesure de la vitesse de rotation d'un moteur en utilisant un système de balais donc une transmission filaire. Ensuite dans la deuxième partie un système sans fils a été mis en place à la fois sur une machine à courant continu et sur une machine asynchrone de 1,5 kW. Ces études nous ont permis d'obtenir, en plus d'une mesure de la vitesse de rotation et de l'accélération du moteur, une méthode fiable et apte à déceler les défauts de désalignement de l'axe de rotation du moteur ainsi que les vibrations de ce dernier. Enfin, une IHM (Interface Homme Machine) a été conçue, afin de rendre, quasi-transparent vis-à-vis de l'utilisateur les différents post-traitements. Globalement, notre approche permet d'obtenir un système de capteur de vitesse de rotation aussi fiable que ceux existants, avec l'avantage d'être intégré au sein du rotor avec la possibilité de superviser les défauts de désalignement ou de vibration d'un actionneur et ensuite de les transmettre à distance sans fils.

ABSTRACT

These research works join within the framework of scientific cooperation between two laboratories: LAPLACE at National Polytechnic Institute of Toulouse in France and LSE at National School of Engineers from Tunis in Tunisia. The main objective of this study consists in proposing a structure of "smart-machines" to introduce them in a network of systems supervised and remote controlled. Consequently, we develop new type of intelligent and autonomous embedded sensors to guarantee simultaneously the supervision and the control of the rotating electrical actuators. The several constraints such as : the dimensions, the measure in situ (directly on the rotor of these machines), the robustness of these sensors in very strong electromagnetic field environment, and also the low cost of the product, have oriented our choice to accelerometers in technology MEMS (Micro Electro Mechanical System). These components present different advantages, on one hand by their low dimensions, and on the other hand by their low energy consumption. Moreover, because of their designs, the electrical voltages obtained from the various outputs of these components are proportional to the small masses movement. The using of them requires the implementation of several signal processing algorithms to extract the rotation speed from these actuators. This led us to use the Variance of Allan and the Genetic Algorithms, to obtain the best certainty of measurements given by these sensors. So, in the first part of this study we develop a measurement device of the rotation speed of an actuator by using a system of brooms thus a wired transmission. Then, in the second part a wireless system was set up at the simultaneously on a direct current (DC) machine and on an induction machine of 1,5 kW. These studies allowed proposing, besides a measure of the electrical actuator rotation speed and its acceleration, the reliable method able to determine the fault of misalignment of the actuator rotation axis as well as its vibrations. Finally, an MMI (Man Machine Interface) was designed, to make quasi-transparent according to the user, the different post signal processing's. Globally, our approach allows obtaining rotation speed sensor system as reliable as those existing, with the advantage to be integrated within the rotor with the possibility to supervise the actuator axis misalignment fault or its vibration and then to transmit them remote by wireless.

PUBLICATIONS

Ibtissem Akacha Helal, Tan-Hoa Vuong, Jacques David, Najiba Mrabet Bellaaj, Maria Pietrzak-David, “*GA based reconstruction method of MEMS accelerometer signal for electrical actuators*”, 18th European Conference on Power Electronics and Applications”, IEEE EPE Conf, Karlsruhe, 5-9 September 2016.

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7695637>

Ibtissem Akacha Helal, Tan-HoaVuong, Najiba Mrabet Bellaaj , Jacques David, Maria Pietrzak-David, “*Reconstruction of MEMS accelerometer outputs in mobile fields by using Allan Variance*”, IEEE ICMIC Conf. proceedings, 7th International Conference on Modelling, Identification and Control indexed by EiCompendex, Sousse, Tunisia, 18-20 December 2015.

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7409419>

Ibtissem Akacha Helal, Tan-HoaVuong, Jacques David, Najiba Mrabet Bellaaj, Maria Pietrzak-David, “*Vibration monitoring based on MEMS accelerators*” , IEEE STA Conf, 16th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control & Computer Engineering, Monastir, Tunisia, 21-23 December 2015

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7505226>

Ibtissem Akacha Helal, Tan-Hoa Vuong, Najiba Mrabet Bellaaj , Jacques David, Maria Pietrzak-David, “*DC-servo motor velocities calculation by MEMS accelerators*”, PET-ACECS2015 Conf. 2nd International Conference on Automation, Control, Engineering and Computer Science, Sousse ,Tunisia, 22-24 March 2015.

http://ipco-co.com/PET_Journal/PET-ACECS2015/30.pdf

Ibtissem Akacha Helal, TaharAchour, Najiba Bellaaj Mrabet, Maria Pietrzak-David “*Identification of electrical and mechanical parameter of induction machine on a dual induction system*”, ELECTRIMACS 2014, 11th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems, Valencia, Spain, 19-22 Mai 2014

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 : Méthodes de mesure de la vitesse de rotation d'un actionneur électrique

Figure 1. 1 Système de contrôle basé sur l'utilisation des capteurs de vitesse et de position [BOU 16].....	10
Figure 1. 2 Différentes méthodes de mesure de la vitesse.....	11
Figure 1. 3 Structure mécanique d'un résolveur [MOO 04].....	12
Figure 1. 4 Association du résolveur avec un convertisseur numérique analogique [BOU 16]	13
Figure 1. 5 Principe de fonctionnement des codeurs optiques	14
Figure 1. 6 Principe de fonctionnement d'un codeur incrémental	15
Figure 1. 7 Signaux de sortie du codeur incrémental	15
Figure 1. 8 Principe de fonctionnement d'un codeur absolu	17
Figure 1. 9 Diagramme relatif de l'estimateur de la vitesse	20
Figure 1. 10 Modèle de référence relatif à un système adaptatif	21
Figure 1. 11 Technique de l'estimation de la vitesse par filtre de Kalman	22

Chapitre 2 : Nouvelle approche pour la mesure de la vitesse de rotation in situ d'une machine électrique tournante

Figure 2. 1 Evolution des applications de la technologie MEMS	30
Figure 2. 2 Marché des MEMS par secteur 2006-2017 [Bou 2013].....	31
Figure 2. 3 Marché des accéléromètres par technologie [WTC 09].....	32
Figure 2. 4 Composition d'un accéléromètre type ADXL202 à deux axes	33
Figure 2. 5 Description des lamelles associées à un capteur MEMS	33
Figure 2. 6 Modèle mécanique d'un accéléromètre MEMS	34
Figure 2. 7 Schéma fonctionnel de l'ADXL203	35
Figure 2. 8 Schéma d'interprétation détaillé du fonctionnement de l'accéléromètre ADXL 203	35

Figure 2. 9 Evolution de l'accélération appliquée. b Evolution de la tension au niveau des sorties du capteur	37
Figure 2. 10 Variation de la sortie du capteur avec sa disposition par rapport à la surface de la terre	37
Figure 2. 11 Localisation du capteur dans les quatre quadrants	38
Figure 2. 12 Mesure de l'angle de déviation du capteur	39
Figure 2. 13 Capteurs et différentes forces appliquées	40
Figure 2. 14 Disposition des deux capteurs.....	41
Figure 2. 15 Emplacement des capteurs sur l'axe de rotation du moteur	42
Figure 2. 16 Différentes forces appliquées sur un capteur en mouvement.....	43
Figure 2. 17 Evolution de la tension de sortie des capteurs dans le sens trigonométrique de rotation.....	44
Figure 2. 18 Evolution de la tension de sortie des capteurs dans le sens anti-trigonométrique de rotation.....	44
Figure 2. 19 Evolution de l'angle de rotation en fonction du temps pour les quatre capteurs.....	45
Figure 2. 20 Evolution de la vitesse en fonction du temps	45
Figure 2. 21 Evolution des sorties des capteurs pour le cas d'une vitesse variable	46
Figure 2. 22 Détermination de la vitesse	46
Figure 2. 23 Organigramme de mesure de la vitesse.....	47
Figure 2. 24 Banc expérimental	47
Figure 2. 25 Evolution de la vitesse de rotation déterminée en fonction du temps, b. Evolution de l'erreur relative à la mesure avec les accéléromètres par rapport à celle d'un tachymètre	49
Figure 2. 26 Organigramme de calcul de la variance d'Allan.....	51
Figure 2. 27 Corrélation entre la variance d'Allan et la vitesse.....	52
Figure 2. 28 Evolution de la variance d'Allan moyenne pour des valeurs différentes de vitesse	53

Chapitre3 : Problématiques liées aux accéléromètres MEMS et solutions envisagées

Figure 3. 1 Localisation des capteurs dans les trois quadrants	60
Figure 3. 2 Evolution d'un signal d'accélération en fonction du temps	61
Figure 3. 3 Evolution spectrale des signaux des accéléromètres en fonction de la fréquence	62
Figure 3. 4 Détermination de la fonction de probabilité de signal	63
Figure 3. 5 a. Fonction de densité de probabilité, b. Fonction de distribution cumulative des signaux issus des accéléromètres	64
Figure 3. 6 Evolution des signaux des capteurs et du signal reconstruit	65
Figure 3.7 Analyse spectrale des signaux des accéléromètres et du signal moyen .	66
Figure 3. 8 Structure de l'algorithme génétique	67
Figure 3. 9 Croisement à 1 site	68
Figure 3. 10 Mutation simple	68
Figure 3. 11 Méthodologie de reconstitution du signal de référence	70
Figure 3. 12.a. Evolution de la variance d'Allan moyenne et celle du signal reconstruit, b. Evolution de l'erreur relative sur la variance d'Allan.....	71
Figure 3. 13.a. Evolution des signaux des capteurs par rapport à ceux du signal reconstruit, b. Evolution du signal reconstruit	71
Figure 3. 14 Motifs élémentaires du signal	73
Figure 3. 15 Localisation du capteur dans les trois quadrants	74
Figure 3. 16.a. Evolution du signal généré et celui de référence, b. Evolution de l'erreur relative.....	75
Figure 3. 17 Organigramme de la méthodologie.....	75
Figure 3. 18 Méthodologie de reconstruction basée sur des critères de performance	77
Figure 3. 19. a Evolution de la fonction de distributions statistique des signaux réel et reconstruit, b. Erreur relative de la fonction de distribution statistique.....	78
Figure 3. 20 Evolution des signaux réel et reconstruit pour un seul motif sinusoïdal	79

Figure 3. 21 Evolution des signaux réel et reconstruit (3 sinusoïdes)	80
Figure 3.22.a Evolution de la fonction de distribution statistique des signaux réel et reconstruit, b. Erreur relative à la fonction de répartition statistique	81
Figure 3. 23 Evolution du signal réel et de celui reconstruit (1 seul motif).....	82
Figure 3. 24 Evolution de la fonction de distribution statistique des signaux réel et reconstruit	83
Figure 3. 25 Évolution du signal réel et de celui reconstruit.....	84
Figure 3.26.a Evolution de la fonction de distribution statistique du signal réel et celui reconstruit, b. Erreur relative de la fonction de distribution statistique	84
 Chapitre 4 : Technologie sans fils au service de la surveillance et du contrôle d'un actionneur tournant	
Figure 4. 1 Canal de transmission.....	94
Figure 4. 2 Mécanismes de propagation	96
Figure 4. 3 Relation liant les positions et les angles relatifs aux antennes émettrice et réceptrice	99
Figure 4. 4 Synoptique du système de communication proposé.....	101
Figure 4. 5 Présentation générale des dispositifs expérimentaux utilisés	104
Figure 4. 6 Connexion entre la carte arduino et l'émetteur ESP8266.....	105
Figure 4. 7 Synoptique de la boucle de transmission.....	106
Figure 4. 8 Schéma synoptique de la boucle de transmission.....	106
Figure 4. 9 Schéma illustrant la communication directe entre client et serveur...	107
Figure 4. 10 Logigramme illustrant les principales étapes menées pour la récupération des données d'accélération.....	107
Figure 4. 11 Test de faisabilité et signaux récupérés via une page web.....	108
Figure 4. 12 a. Banc de test expérimental utilisé pour la récupération des données sans fils, b. Zoom nœud capteur	109
Figure 4. 13 Evolution de l'accélération au cours du temps pour une vitesse de 27rad/s.....	109
Figure 4. 14 Evolution des signaux filaires vs sans fils.....	110

Figure 4. 15.a Evolution des signaux pour une vitesse de 27 rad/s. b. Evolution des variances d'Allan relatives aux signaux ayant comme vitesse 27 rad/s.	111
Figure 4. 16.a. Evolution de la variance d'Allan relative aux signaux pour des valeurs de vitesse différentes (27rad/s, 33rad/s, 39rad/s), b. Evolution temporels de signaux ayant des valeurs de vitesse différentes (27rad/s, 33rad/s, 39rad/s)	112
Figure 4. 17 Evolution de la variance d'Allan pour des acquisitions obtenues avec différentes valeurs de vitesse.....	113
Figure 4. 18. Détermination de la variance d'Allan relative à Ω_3	114
Figure 4. 19. Méthodologie proposée pour l'élaboration d'une base de données...	115
Figure 4. 20. Méthodologie de reconstruction basée sur les critères de performances adoptée aux signaux sans fils	116
Figure 4. 21. Suivi de l'évolution de la variance d'Allan en fonction de la vitesse .	116
Figure 4. 22. Suivi de l'évolution de la fonction de répartition statistique en fonction de la vitesse	117
Figure 4. 23 Evolution des accélérations reconstruites et réelles	118
Figure 4. 24 Evolution de la variance d'Allan relative au signal réel et celui reconstruit	118
Chapitre 5 : Détection des vibrations du rotor d'un actionneur tournant	
Figure 5. 1 Banc expérimental à base d'une MAS sans capot	126
Figure 5. 2 Evolution du signal d'accélération. b. Zoom sur l'évolution de l'accélération.....	127
Figure 5. 3 Evolution de la variance d'Allan relative à un signal d'accélération pris dans le cas de la machine asynchrone	128
Figure 5. 4 Cycle de variation de vitesse programmé sur une carte arduino	128
Figure 5. 5 Evolution des accélérations pour un cycle variable de vitesse.....	129
Figure 5. 6 Evolution de la variance d'Allan relative à un cycle variable de vitesse	129
Figure 5. 7 Evolution des accélérations pour des valeurs de vitesses variables....	130
Figure 5. 8 Evolution de la variance d'Allan relativement à un cycle variable de vitesse.....	130

Figure 5. 9 Disposition des capteurs par rapport à l'axe de rotation	131
Figure 5.10 Evolution des signaux d'accélération pour une position D1 par rapport à l'axe de rotation.....	132
Figure 5. 11 Evolution des signaux d'accélération pour une position D2 par rapport à l'axe de rotation	132
Figure 5. 12 Comparaison entre deux signaux d'accéléromètres placés à des distances différentes par rapport à l'axe de rotation	133
Figure 5. 13 Banc expérimental à base d'une MAS et en présence de capot.....	134
Figure 5. 14 Evolution temporelle du signal d'accélération avec et sans capot pour un même état de rotation (a. Sans capot, b. Avec capot).....	134
Figure 5. 15 Evolution des signaux de vibrations par rapport au temps	135
Figure 5. 16 Méthode manuelle pour la surveillance des vibrations.....	136
Figure 5. 17 Bancs d'essai expérimental	137
Figure 5. 18 Schématisation de la stratégie proposée	138
Figure 5. 19 Evolution temporelle d'accélération avant et après injection de vibration (200mV/500Hz).....	139
Figure 5. 20 Evolution spectrale d'accélération avant et après injection de vibration (200mV/500Hz)	139
Figure 5. 21 Evolution temporelle du signal avec variation d'amplitude de signal de vibration	140
Figure 5. 22 Evolution spectrale d'accélération avant et après injection de vibration (200mV/200Hz)	140
Figure 5. 23 Comparaison entre l'évolution temporelle d'accélération après l'injection de vibration de (200mV/500Hz) et celle (200mV/200Hz)	141
Figure 5. 24 Evolution temporelle d'accélération avant et après	141
Figure 5. 25 Effet de variation d'amplitude des vibrations sur l'évolution spectrale du signal.....	142
Figure 5. 26 Evolution spectrale du signal avec injection d'un signal de vibration pour une vitesse de rotation de 13rad/s.....	144

Figure 5. 27 Evolution spectrale du signal avec injection d'un signal de vibration pour une vitesse de rotation de 27rad/s.....	144
Figure 5. 28 Architecture du programme principal.....	145
Figure 5. 29 Interface Homme Machine.....	147

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 2 : Nouvelle approche pour la mesure de la vitesse de rotation in situ d'une machine électrique tournante

Table 2. 1. Approche proposée pour la détermination de la vitesse	43
Table 2. 2. Calcul du gain et d'offset	48
Table 2. 3 Liaison entre l'écart de la variance d'Allan et la vitesse	53

Chapitre3 : Problématiques liées aux accéléromètres MEMS et solutions envisagées

Table 3. 1. Poids relatifs pour chaque signal	72
Table 3. 2 Evolution des critères en fonction de la vitesse	76
Table 3. 3 Résultats d'optimisation relatifs aux critères d'optimisation.....	78
Table 3. 4 Les paramètres relatifs à un signal reconstruit à partir d'une seule sinusoïde	78
Table 3. 5 Résultats d'optimisation relatifs aux critères d'optimisation.....	80
Table 3. 6. Résultats d'optimisation relatifs aux critères d'optimisation.....	81
Table 3. 7 Résultats relatifs aux critères de performances.....	83
Table 3. 8 Paramètres identifiés du signal	83
Table 3. 9 Résultats d'optimisation relatifs aux critères d'optimisation.....	85
Table 3. 10. Résultats d'identification relatifs à un harmonique sinusoïdal cas de Ω_3	85
Table 3. 11. Résultats d'identification pour différentes valeurs de vitesse.....	85

Chapitre 4 : Technologie sans fils au service de la surveillance et du contrôle d'un actionneur tournant

Table 4. 1 Valeurs de performances sans fils.....	103
Table 4. 2 Performances du protocole utilisé	103
Table 4. 3 Evolution des valeurs maximales des signaux en fonction de la vitesse	117
Table 4. 4 Résultats d'identification pour une vitesse de 27 rad/s.....	119

Table 4. 5 Résultats d'identification pour une vitesse de 33 rad/s.....	119
Table 4. 6 Résultats d'identification pour une vitesse de 39 rad/s.....	120
Table 4. 7 Résultats d'identification pour les différentes vitesses.....	120

Chapitre 5 : Détection des vibrations du rotor d'un actionneur tournant

Table 5. 1 Paramètres relatifs à la MAS	126
Table 5. 2 Réponse spectrale suite à une injection des harmoniques 200mV/500Hz	143
Table 5. 3 Réponse spectrale suite à une injection des harmoniques 300mV/500Hz	143
Table 5. 4 Réponse spectrale suite à une injection des harmoniques 400mV/500Hz	143

GLOSSAIRE

MEMS	: Micro-Systèmes-Electro-Mécaniques
DARPA	: Defense Advanced Research Projects Agency
AG	: Algorithme génétique
g	: Gravité « accélération de la pesanteur » 9.8m/s^2
F_m	: Fréquence de rotation de l'arbre du moteur (Hz)
F	: Fréquence d'alimentation du moteur (Hz)
P_e	: Précision désirée du codeur (degré °),
N_r	: Nombre de points du codeur (résolution)
w_s	: Pulsation synchrone
w_g	: Pulsation de glissement.
φ_d, φ_q	: Composantes de flux dans les deux axes d et q
i_d, i_q	: Courants statoriques dans les deux axes d et q
L_M	: Inductance de magnétisation
τ_r	: Constante de temps rotorique
a	: Accélération
f	: Facteur d'échelle
b	: Biais
FOC	: Contrôle vectoriel à flux rotorique
G_e	: Gain d'une antenne d'émission
P_e	: Puissance du signal émis
λ	: Longueur d'onde
W	: Densité de puissance de signal
$\sigma(\tau)$: Variance d'Allan
f_{moy}	: Adaptation moyenne de la population
f_{max}	: Adaptation maximale de la population
\mathcal{E}	: Précision requise sur la convergence.
N_f	: Nombre de fourchettes
Cdf	: Cumulative Distribution Function.

TPMS	: Contrôle automatique de la pression des pneus (Tire Pressure Monitoring System)
W	: Puissance disponible au niveau de l'antenne
G_E	: Gain de l'antenne d'émission,
P_E	: Puissance du signal émis,
d	: Distance séparant l'antenne d'émission à celle de réception.
S_T	: Position de l'émetteur,
S_r	: Position du récepteur
S_r'	: Projection selon le plan XOY,
V_T	: Vitesse linéaire,
R_T	: Rayon de rotation
w_n	: Vitesse de rotation de l'émetteur.
f_{moy}	: Fonction d'adaptation moyenne
f_{max}	: Fonction d'adaptation maximale de la population
ε	: Précision requise sur la convergence.
W	: Densité de puissance de signal
P_E	: Puissance disponible au niveau de l'antenne
G_R	: Gain à la réception
MAS	: Machine asynchrone
MCC	: Machine à courant continu
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$: Courants statorique,
$\phi_{s\alpha}, \phi_{s\beta}$: Flux rotorique selon les axes $\alpha\beta$
$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$: Tension du stator selon les axes $\alpha\beta$
R_s, R_r	: Résistance statorique et rotorique,
L_m	: Inductance mutuelle entre les bobinages statoriques et rotoriques
L_f	: Inductance de fuite
J	: Moment d'inertie
p	: Nombre de paires de pôles de la machine

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La surveillance et le contrôle des machines tournantes, à base de capteurs filaires a été depuis longtemps l'objectif de plusieurs travaux de recherche. Cependant, ce lien filaire entre l'ensemble des capteurs (vitesse, courants, tensions..) et les dispositifs à contrôler souffre de défaillances et se heurte à des limitations dont les plus courantes sont :

- ✓ Le prix d'installation,
- ✓ L'encombrement,
- ✓ La fiabilité.

Actuellement, avec le regain d'intérêt et le développement important que la transmission sans-fil connait dans de multiples applications, une utilisation de cette technologie s'avère intéressante pour assurer le contrôle et la surveillance à distance de l'état de fonctionnement des actionneurs tournants. Les technologies sans fils s'inscrivent dans une tendance mondiale de la communication mobile, de la facilité et de la souplesse de mise en œuvre. En plus, l'avancement vécu dans le domaine des micro-fabrications a permis d'offrir de nouvelles perspectives pour des dispositifs communicants embarqués. Dans ce contexte interviennent les travaux menés au cours de cette thèse où le développement d'une instrumentation embarquée, intelligente, fiable, communicante sera présenté. Le dispositif proposé permet d'assurer la tâche du contrôle et de la surveillance d'un actionneur tournant.

Un choix a été porté sur l'accéléromètre en technologie MEMS pour la détermination de la vitesse et de la surveillance des vibrations d'un moteur électrique. Ce choix est lié essentiellement à l'aspect multifonctionnel que ce type de capteur miniaturisé permet d'offrir.

La nature des sorties de ce type de dispositifs a nécessité une mise en place d'algorithmes de traitement du signal pour extraire l'information de la vitesse de rotation du moteur. La variance d'Allan et la technique des Algorithmes Génétiques (AG), ont été utilisées pour obtenir de meilleures performances sur la mesure de la vitesse.

Dans une première partie de ce travail nous avons développé une maquette de mesure de la vitesse de rotation d'un moteur à base d'un système de balais, donc une transmission filaire. Ensuite, après avoir validé les différents algorithmes proposés, nous avons abordé l'étude dans le cas sans fils. Deux types de dispositifs ont été mis en place pour valider le concept proposé à savoir la machine à courant continu (MCC) et celle asynchrone (MAS). Le fonctionnement à vitesse constante et variable a été testé pour valider notre approche et la réponse des algorithmes développés pour chaque cas a été bien soulignée. Les résultats obtenus offrent de nouvelles perspectives pour des dispositifs d'entraînement électriques

D'autre part, une interface Homme-Machine a été développée sur LABVIEW offrant à l'utilisateur une simplicité de suivi et de contrôle de l'évolution des signaux issus de la machine comme la vitesse et l'accélération.

Ce présent travail est organisé en cinq chapitres.

Au cours du premier chapitre nous présenterons un descriptif des différentes solutions existantes pour la détermination de la vitesse des machines électriques. Nous exploiterons leurs limites par rapport aux exigences actuelles recherchées en termes de performances, de miniaturisation, de fiabilité et de sûreté de fonctionnement.

Au niveau du deuxième chapitre nous introduirons les accéléromètres de technologie Micro-Systèmes-Electro-Mécaniques (MEMS) en tant qu'une nouvelle solution de mesure de vitesse d'un actionneur tournant bénéficiant d'une extrême miniaturisation et ayant une faible consommation. Cette solution sera détaillée et les résultats trouvés par simulation seront donnés. Ensuite, au niveau de la partie expérimentale nous présenterons le banc expérimental utilisé pour la mesure, les étapes nécessaires pour avoir l'information sur la vitesse et les résultats trouvés. Le troisième chapitre sera dédié aux problématiques liées à ce type de dispositifs. Une étude des signaux délivrés par les accéléromètres a été conduite. Ensuite, des solutions seront proposées pour améliorer les performances. L'accent sera mis particulièrement sur une nouvelle approche basée sur l'utilisation (AG) selon certains critères de performances adéquats.

Le quatrième chapitre sera consacré à l'approche sans fils utilisée pour la détermination de la vitesse d'une part et à la présentation des dispositifs matériels utilisés et des outils de programmation mis en œuvre d'autre part. Ensuite nous détaillons la méthodologie suivie pour l'élaboration du contrôle sans fils.

Le dernier chapitre sera dédié à la surveillance de la machine à partir des signatures de vibrations. Une interface (Homme-Machine) sera développée pour la supervision en temps réel et le contrôle à distance de la machine. Nous achèverons notre rapport par les différentes conclusions et des discussions qui mèneront à soulever des perspectives plus larges à ce travail.

CHAPITRE 1 : MÉTHODES DE MESURE DE LA VITESSE DE ROTATION D'UN ACTIONNEUR ÉLECTRIQUE



Résumé

La présence des capteurs dans les machines est primordiale pour assurer la protection et le contrôle des dispositifs. Ils sont généralement utilisés pour la mesure directe ou alternative des grandeurs électriques (courants et/ou tensions), ou des variables mécaniques (vitesse ou/et position) et de la température. L'exigence des applications en termes de coût, fiabilité et environnement de fonctionnement nécessite un respect de certains critères comme le type, le nombre et la technologie des dispositifs de mesure utilisés.

Dans certains cas, pour satisfaire les exigences en termes de fiabilité et de sûreté de fonctionnement des dispositifs, un remplacement des capteurs par des observateurs ou des estimateurs est nécessaire. Ces derniers sont basés sur une modélisation par des équations mathématiques déterminées à partir du modèle de la machine.

Au cours de ce chapitre, un descriptif des solutions existantes pour la détermination de la vitesse est présenté. Les limites de telles méthodes par rapport aux exigences actuelles recherchées en termes de performances, miniaturisation, fiabilité, sûreté de fonctionnement seront soulignées. Un appel à une nouvelle approche de mesure de la vitesse sera envisagé pour la suite.

Sommaire

1.1. INTRODUCTION	9
1.2. INTERET DE LA MESURE DE LA VITESSE	9
1.3. LES METHODES CLASSIQUES DE DETERMINATION DE LA VITESSE D'UN ACTIONNEUR TOURNANT	10
1.3.1. Méthodes directes de mesure de vitesse.....	11
1.3.1.1. Les Résolveurs	11
1.3.1.2. Les Codeurs optiques	13
1.3.1.2.1. Codeur incrémental	14
1.3.1.2.2. Codeurs absolus	16
1.3.1.3. Génératrices tachymétriques	18
1.3.2. Méthodes indirectes	18
1.3.2.1. Généralités	18
1.3.2.2. Approches fondées sur le modèle dynamique de la machine	19
1.3.2.3. Les Techniques basées sur les méthodes de traitement de signal	22
1.4. METHODE PROPOSEE POUR LA DETERMINATION DE LA VITESSE DANS UNE APPLICATION EMBARQUEE	23

1.5. CONCLUSION 24

1.1. INTRODUCTION

La mise en place d'une commande vectorielle directe ou indirecte pour la machine électrique est essentielle pour assurer un fonctionnement à des dynamiques élevées. Cette commande requiert un appel à des capteurs (codeurs incrémentaux, codeurs absolus..) pour la mesure de la vitesse et/ou de la position rotorique. Cependant, une mise en place de tels dispositifs entraîne un surcoût important et nécessite de prévoir une place supplémentaire ce qui n'est pas toujours souhaitable ou possible. D'autre part, ces dispositifs nécessitent un soin particulier pour eux-mêmes et pour leurs connectiques ce qui peut diminuer la fiabilité du système. A partir de ces constatations, des recherches sur la commande sans capteurs ont été menées.

De nos jours, avec le développement vécu dans le domaine des réseaux de télécommunication et du traitement de l'information, une demande de machines intelligentes est de plus en plus envisagée. De nouvelles performances des capteurs sont de plus en plus envisagées à savoir la miniaturisation, la fiabilité, la consommation et le coût. Dans ce contexte sont situés les travaux menés au cours de ce chapitre où les solutions actuellement présentes dans la bibliographie pour la mesure et la détermination de la vitesse sont illustrées. L'accent sera mis principalement sur leurs limites par rapport aux exigences d'une application sans fils, objectifs principaux de notre étude.

1.2. INTERET DE LA MESURE DE LA VITESSE

Certes, la connaissance précise de l'information de la vitesse et/ou de la position de rotation est primordiale pour assurer le contrôle des machines électriques (de basses ou de hautes vitesses). Cependant, cela ne peut être assuré que par un choix convenable des capteurs permettant d'assurer cette tâche. Ce choix dépend essentiellement des caractéristiques relatives aux capteurs, à savoir leurs résolutions et leurs précisions [BOU 16].

En effet, un capteur de position est un élément de base dans les systèmes d'entraînements électriques à vitesse variable comme l'illustre la Figure 1.1. Il permet de fournir les informations nécessaires pour la commande du moteur électrique qui sont généralement liées à la position et à la vitesse.

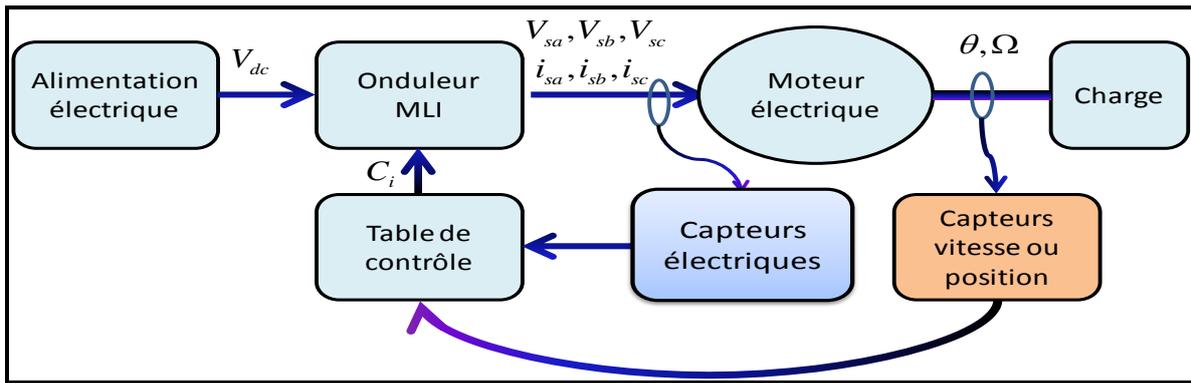


Figure 1. 1 Système de contrôle basé sur l'utilisation des capteurs de vitesse et de position [BOU 16]

Les résolveurs, les codeurs incrémentaux et les codeurs absolus sont considérés comme étant les capteurs de position et de vitesse les plus répandus. Les caractéristiques de ces dispositifs doivent satisfaire aux exigences de l'application étudiée. D'autre part, chaque capteur possède son type d'application privilégiée. Par exemple le résolveur est généralement utilisé pour les applications robotiques. Les codeurs optiques sont utilisés pour les machines-outils exigeant une précision plus importante. Donc, le choix du capteur pour une application ou une autre est principalement lié aux caractéristiques de ce dernier en tant que précision, linéarité, type de mesure qu'il délivre (absolue ou relative), le temps de réponse et sa sensibilité aux bruits [BOU 16].

1.3. LES METHODES CLASSIQUES DE DETERMINATION DE LA VITESSE D'UN ACTIONNEUR TOURNANT

L'information sur la vitesse est fournie via un appel à des méthodes de mesures directes ou indirectes (figure 1.2). Les méthodes directes consistent à l'utilisation des capteurs physiques de vitesse ou de position comme les codeurs incrémentaux, les codeurs absolus et les résolveurs. Cependant, pour certaines applications où des contraintes d'encombrement et de coût sont imposées, un appel à des méthodes indirectes de mesure s'avère nécessaire. Ces dernières se basent sur l'utilisation des estimateurs ou des observateurs, et ils permettent la reconstruction de l'état à partir d'un modèle ou d'un système dynamique avec l'utilisation des mesures d'autres grandeurs électriques, à savoir les courants et les tensions. Les différentes méthodes de détermination de la vitesse d'un actionneur tournant sont présentées dans la figure 1.2.

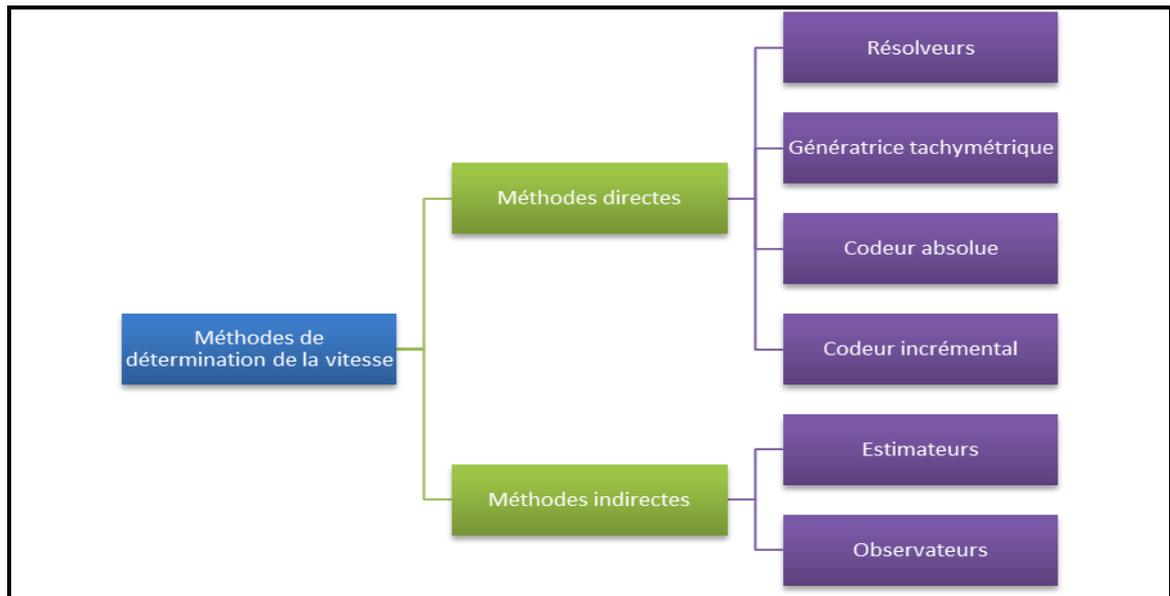


Figure 1. 2 Différentes méthodes de mesure de la vitesse

Nous aborderons dans la suite le principe de fonctionnement des capteurs de vitesse les plus répandus ainsi que celui des estimateurs et des observateurs de vitesse les plus connus.

1.3.1. Méthodes directes de mesure de vitesse

Cette méthode se base principalement sur l'utilisation des capteurs permettant d'accéder directement à l'information de vitesse comme les résolveurs, les codeurs optiques (incrémentaux ou absolus), et les génératrices tachymétriques.

1.3.1.1. Les Résolveurs

Le résolveur est un capteur de position caractérisé par sa fiabilité et sa robustesse. Il est capable de fonctionner dans des environnements sévères (valeurs élevées de températures). En effet, étant placé sur l'arbre du moteur et aligné avec le champ magnétique, il permet de fournir la valeur sur la position absolue du rotor ce qui est important pour assurer le contrôle du moteur [BOU 16].

Ce capteur est composé, d'un bobinage primaire au niveau du rotor, et deux bobinages secondaires déphasés au niveau du stator dont le couplage magnétique entre les deux dépend essentiellement de la position du rotor comme l'illustre la figure 1.3.

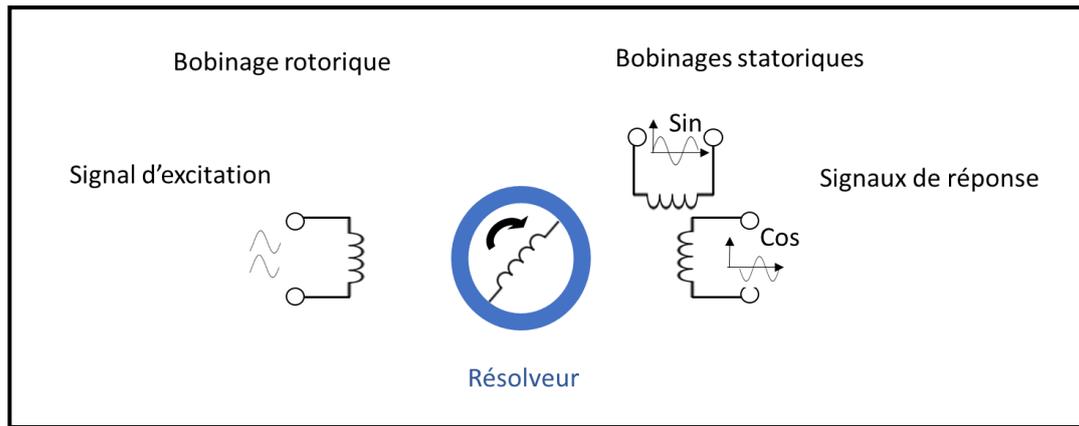


Figure 1. 3 Structure mécanique d'un résolveur [MOO 04]

Une alimentation du bobinage primaire par une tension alternative sinusoïdale (tension de référence pour les bobinages du rotor) donne naissance à deux tensions en quadrature de phase au niveau des bobinages secondaires statoriques. Ces tensions présentent des fonctions de cosinus et de sinus de l'angle de rotation de l'axe du rotor [MOO 04], [DDC 94], [DOU 08] présentées dans les équations 1.1, 1.2 et 1.3.

$$V_e = V_s \sin(2\pi ft) \quad 1.1$$

$$V_1 = V_s \sin(2\pi ft) \cos \theta \quad 1.2$$

$$V_2 = V_s \sin(2\pi ft) \sin \theta \quad 1.3$$

L'information sur la position sera déduite à partir de la tension d'alimentation du rotor et des tensions délivrées par le stator. D'autre part, pour avoir la valeur numérique correspondante à la position, un appel à un convertisseur analogique numérique (ADC) (*Analog to Digital Converter*) est nécessaire. Ce module permet la conversion de la position analogique délivrée par le résolveur en une position numérique codée sur n bits.

La conversion est basée principalement sur les étapes suivantes :

- ✓ Génération d'un angle numérique Φ ,
- ✓ Comparaison entre l'angle numérique avec l'angle analogique délivré par le résolveur,
- ✓ Ajustement continu de l'angle Φ pour annuler le terme de différence $(\theta - \Phi)$.

Il est noté que l'annulation de la différence $(\theta - \Phi)$ définit l'angle Φ correspondant à une nouvelle position du rotor. Le principe de la mesure de la position utilisant les résolveurs est schématisé dans la figure 1.4

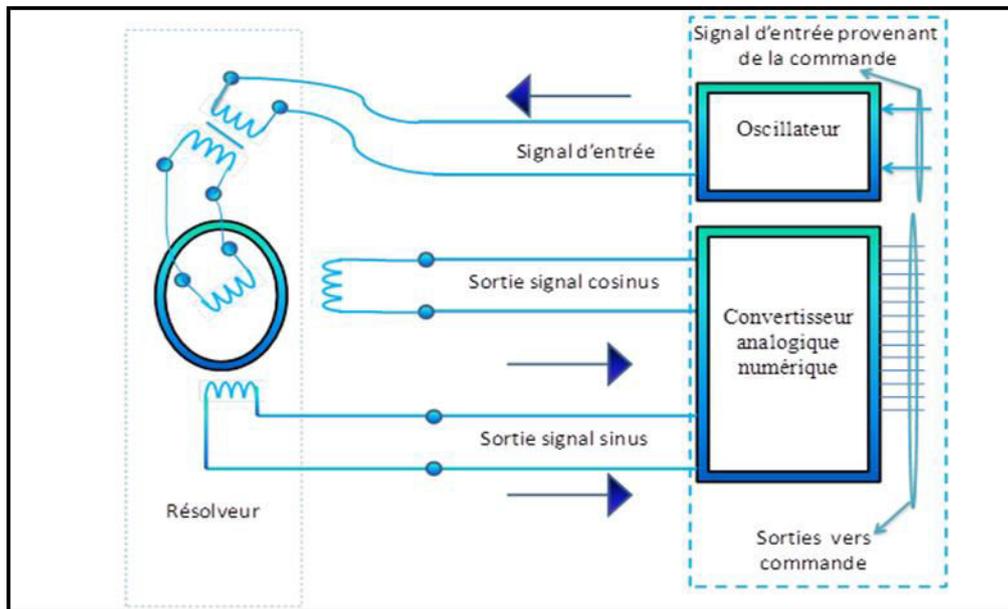


Figure 1. 4 Association du résolveur avec un convertisseur numérique analogique [BOU 16]

La procédure de conversion analogique numérique est effectuée grâce à un appel aux modules de conversion analogique existant dans les outils de programmation. Les tensions sinus et cosinus relatives aux sorties des bobinages statoriques du résolveur sont appliquées aux deux ADC. Le calcul de l'angle de rotation est par la suite effectué selon l'expression 1.4

$$\theta = a \tan^{-1}\left(\frac{V_2}{V_1}\right) \quad 1.4$$

1.3.1.2. Les Codeurs optiques

Le fonctionnement d'un codeur optique est basé essentiellement sur les techniques de balayage optique. Deux types de codeur optique sont utilisés qui sont les codeurs absolus et ceux incrémentaux [HEI12], [SCH05]. Un codeur optique est composé d'un disque en rotation, d'une photodiode ainsi qu'une source lumineuse comme l'illustre la figure 1.5. Son principe de fonctionnement peut se résumer comme suit : initialement le capteur est lié mécaniquement à l'arbre qui l'entraîne; son axe fait tourner un disque qui lui est solidaire, comportant une succession de parties opaques et transparentes.

D'autre part, une LED émet de la lumière qui passe à travers le disque en rotation. Quand l'arbre du codeur tourne les différentes parties transparentes et opaques passent devant la photodiode qui reçoit la lumière déjà émise ce qui permet d'avoir un signal d'impulsion au niveau de la sortie. Ce signal présente une période identique à celle de la vitesse qui est calculée par la succession de deux parties opaques et transparentes. Le nombre des paires de parties transparentes et opaques du codeur définit donc sa résolution. La précision de la mesure de la position dépend essentiellement de la précision de l'assemblage mécanique du codeur.

Ainsi un codeur incrémental ayant une résolution de 2048 points permet d'aboutir à une erreur sur la mesure de la position inférieure à l'erreur relative du résolveur.

Le choix du codeur de position dépend essentiellement de la position détectée et du niveau de la qualité de la détection, c'est-à-dire précision, nombre de points et rapidité [HEI 12].

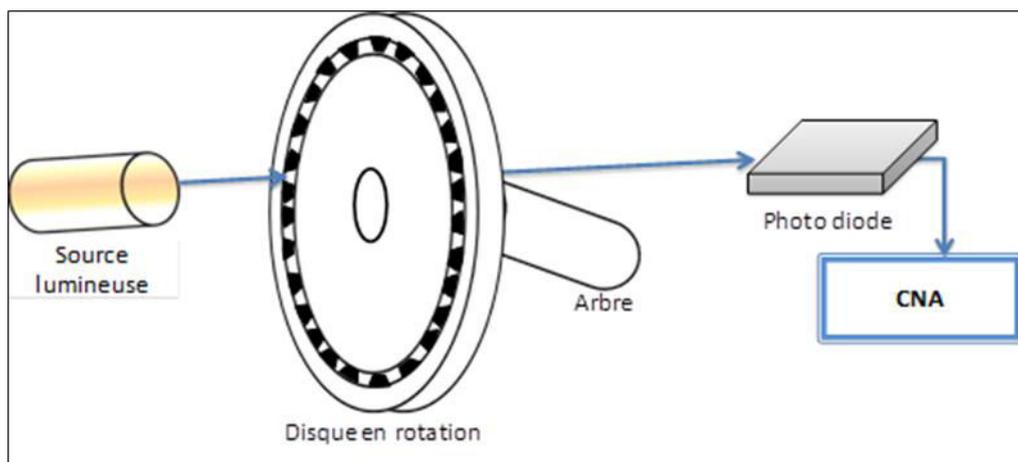


Figure 1. 5 Principe de fonctionnement des codeurs optiques

1.3.1.2.1. Codeur incrémental

Les codeurs incrémentaux représentent une des solutions les plus répandues pour la mesure de la vitesse. Ils permettent de délivrer une information de déplacement angulaire du disque en rotation sous la forme d'un nombre d'impulsions proportionnels à l'angle de rotation effectué. Ce type de capteur est caractérisé par son faible coût en le comparant aux autres types de capteurs de position. La sortie du codeur incrémental est composée de trois signaux (A, B et Z) comme l'illustre la figure 1.6.

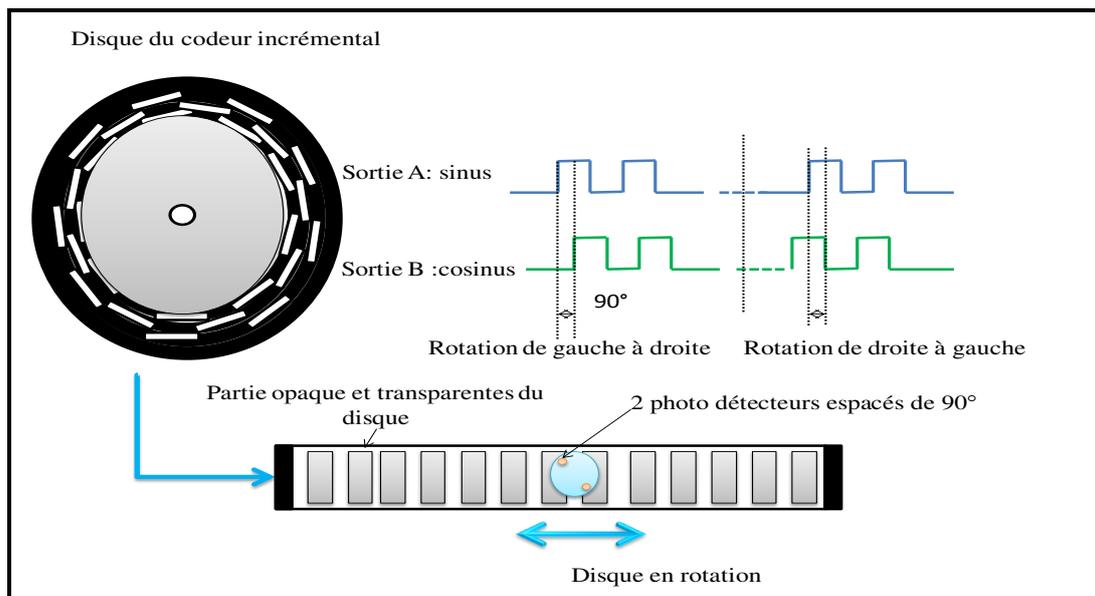


Figure 1. 6 Principe de fonctionnement d'un codeur incrémental

Les deux signaux A et B sont déphasés d'un angle de 90° ce qui permet la détermination du sens de rotation. Le signal Z (index) est utilisé pour repérer la position de référence et pour assurer le comptage des tours. Dans le cas d'une évolution dans un sens direct et pendant un front montant du signal A, le signal B se met à 0. Cependant dans le cas d'une évolution dans le sens inverse et durant le front montant du signal A, le signal B prend la valeur 1.

Les signaux A et B passent à travers un disque en rotation divisés en un nombre de N_r parties transparentes et opaques. Ces parties définissent la résolution du capteur et le nombre d'impulsions permet d'avoir un codage par tour complet de disque. Il est noté que A et B sont générés d'une façon complémentaire comme le mentionne la figure 1.7

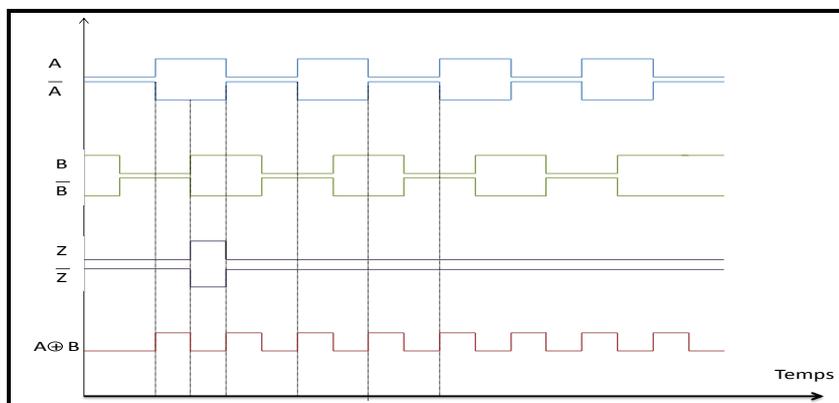


Figure 1. 7 Signaux de sortie du codeur incrémental

Le nombre de points du codeur dans un état de rotation est calculé selon l'expression 1.5

$$N_r = 360 \times \frac{1}{p_e} \times \frac{f_m}{f_c} \quad 1.5$$

Avec p_e , f_c et f_m et N_r sont respectivement

- f_m : Fréquence de rotation de l'arbre du moteur (Hz)
- f_c : Fréquence d'alimentation du moteur (Hz)
- p_e : Précision désirée du codeur (degrés),
- N_r : Nombre de points du codeur (résolution)

Le codeur incrémental est utilisé dans diverses applications, particulièrement celles exigeant des performances standards. Cependant, les limites d'un tel dispositif sont reliées essentiellement à sa sensibilité vis-à-vis des faibles variations de la puissance électrique ce qui peut causer des pertes sur l'information et sur la position. Généralement, le signal délivré par un codeur incrémental est caractérisé par sa fréquence élevée. Donc, le système de traitement doit être le plus rapide possible pour répondre aux impulsions du codeur, car une perte de pulsation introduit une erreur sur la position. Les codeurs incrémentaux sont considérés comme étant les capteurs de position les plus simples à utiliser puisque leur principe se base essentiellement sur l'utilisation d'un détecteur et d'un simple code de programmation. Cependant, il requiert l'utilisation d'un système de remise à zéro pour avoir la position correcte du rotor. De ce fait, les limites de ce type de codeur sont liées principalement à la mesure qu'il délivre puisqu'elle est obtenue par un comptage du nombre de périodes relatives au signal de sortie quand il est alimenté. Ce capteur permet donc de fournir une mesure relative (c'est-à-dire en connaissant la position du codeur à l'état initial, sinon, il est impossible de connaître la position exacte de l'arbre. Pour cette raison, lorsque le codeur incrémental est utilisé dans les applications à base de servo moteur, un alignement pour chaque valeur de tension est nécessaire.

1.3.1.2.2. Codeurs absolus

Les codeurs optiques, utilisent des roues plus complexes, avec un nombre de voies plus importantes (n), afin de détecter la position du rotor d'un moteur électrique. La lecture simultanée de toutes les pistes permet d'avoir un code binaire représentatif de la position angulaire du codeur par tour. Les pistes sont organisées comme suit : la première, localisée au niveau du centre, présentant le bit du poids fort (MSB). Cette piste possède une moitié opaque et une moitié transparente. Allant

vers l'extérieur, une deuxième piste divisée en quatre quadrants alternativement situés, ensuite, une troisième divisée en 8 quadrants etc. La piste qui représente le bit du poids faible (LSB) est celle située à l'extérieur, ce qui permet de donner une meilleure précision de mesure (figure 1.6). Il faut noter qu'un tour complet permet de coder 2^n positions. Le capteur absolu, est plus onéreux en le comparant avec les capteurs incrémentaux, étant donné la nature discrète du signal, un effet de quantification peut gêner surtout pour les très basses valeurs de vitesses. Il est noté que la précision de la position angulaire dépend essentiellement du nombre de pistes. Si le nombre de pistes augmente, la précision angulaire augmente à son tour. Mis à part ces inconvénients qui sont liés à sa résolution et son prix élevé, un tel capteur est caractérisé par sa capacité de stockage qui lui permet de mémoriser sa position à l'état précédent. Ce capteur permet donc la mesure de la position absolue de l'arbre du moteur et il est adéquat pour les applications nécessitant des performances élevées. Cependant, il est plus sensible aux défauts puisque sa taille augmente quand la résolution devient supérieur à 1000 points/ révolution. Donc, la qualité de la lumière transmise au détecteur décroît considérablement quand la vitesse augmente.

Le codeur absolu est plus efficace que celui incrémental vu sa technique de fonctionnement qui permet de soulager les limites du codeur incrémental. Les évolutions des sorties de ce capteurs sont décrites dans la figure 1.8.

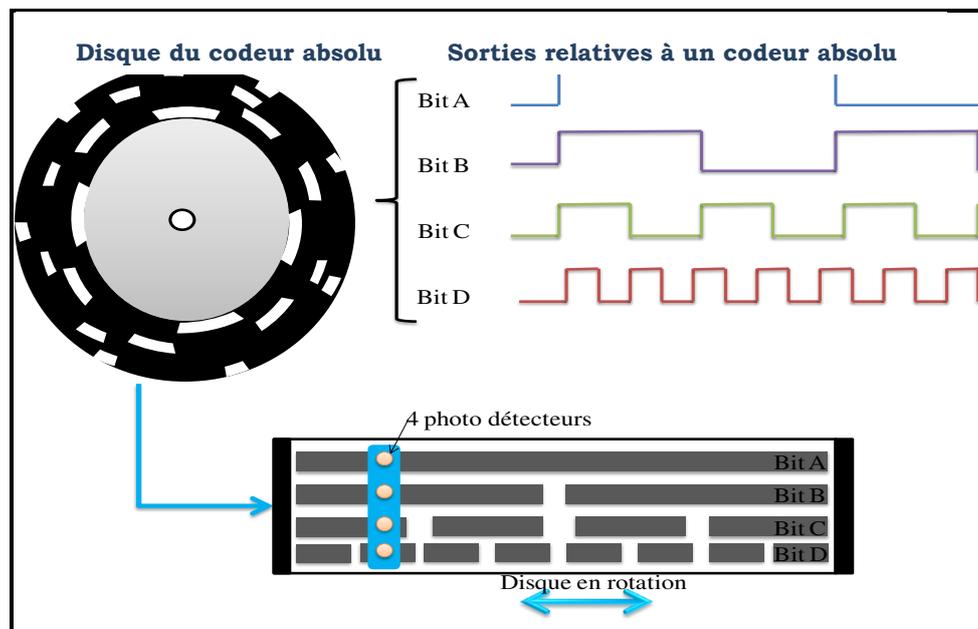


Figure 1. 8 Principe de fonctionnement d'un codeur absolu

1.3.1.3. Génératrices tachymétriques

La génératrice tachymétrique est un outil de mesure de vitesse présentant le même principe que celui d'une machine à courant continu, mais inversé. Elle permet de délivrer une tension proportionnelle à sa vitesse. L'inducteur est généralement un aimant permanent et l'induit est un bobinage. Ce capteur possède certains avantages qui sont liés essentiellement à sa bonne linéarité, son niveau de signal élevé, sa bonne précision et sa haute fiabilité. Cependant, il présente des risques de parasites liés à la commutation.

L'existence des capteurs mécaniques dans les chaînes de contrôle des machines peut parfois être très onéreuse et difficile à mettre en place d'où la nécessité de remplacer ces dispositifs par des méthodes indirectes, à savoir les observateurs et les estimateurs, permettant la mesure de l'information de vitesse indirectement à partir des grandeurs électriques. Un descriptif des méthodes d'estimation les plus utilisées pour la détermination de la vitesse à partir des variables électriques (courants ou tensions) est présenté dans la suite.

1.3.2. Méthodes indirectes

1.3.2.1. Généralités

Les stratégies de contrôle, de surveillance et de gestion énergétique des actionneurs électriques exigent des informations sur certaines grandeurs comme la vitesse de rotation. La mesure directe de cette grandeur requiert une utilisation de capteurs électromécaniques ou optoélectroniques, ce qui représente parfois un inconvénient majeur pour les systèmes d'entraînement vu les contraintes de coût, de maintenance et de fiabilité. Ainsi, un remplacement de ces capteurs par des observateurs ou des estimateurs s'avère essentiel dans certains cas. Ces derniers permettent de reproduire l'information de la vitesse à partir des grandeurs électriques. Les équations des observateurs se basent essentiellement sur le modèle mécanique ou électrique des machines ou même les deux à la fois. Dans le premier cas, nous les appelons observateurs partiels car ils sont basés sur un seul type de modèle (simple et linéaire). Pour le second cas, ils sont appelés observateurs à mode global. Le fonctionnement sans capteurs de vitesse a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche. Ainsi, de multiples types d'observateurs et d'estimateurs ont été développés au niveau de la bibliographie et divers schémas ont été élaborés pour permettre l'estimation de la valeur de la vitesse rotorique à partir des informations électriques du moteur. Au cours de cette partie, l'accent sera mis

particulièrement sur le principe général des estimateurs et des observateurs les plus répandus particulièrement pour les machines asynchrones en tant que dispositifs tournants. En effet, selon leur modélisation, une classification sera établie. Les méthodes citées au cours de ce travail seront classées en trois catégories qui sont les suivantes :

- Les techniques fondées sur le modèle dynamique de la machine,
- Les techniques basées sur le traitement de signal,
- Les techniques basées sur le concept de l'heuristique (comme l'intelligence artificielle).

Ces différentes approches seront détaillées dans la suite.

1.3.2.2. Approches fondées sur le modèle dynamique de la machine

Dans ces approches, l'estimation de la vitesse est basée sur de multiples techniques comme le calcul de la pulsation de glissement dans un régime établi [BOS 01], la détermination directe en se basant sur les équations dynamiques de la machine [BOL 97], la régression linéaire, les observateurs d'états déterministes et stochastiques (le filtre de Kalman) et les systèmes adaptatifs avec modèle de référence [RAJ 96].

Les méthodes d'estimation de la vitesse basées sur le modèle dynamique de la machine, souffrent d'une faiblesse commune puisqu'elles sont basées sur le modèle électromécanique de la machine qui peut être trop simpliste, conséquence des hypothèses qui peuvent être vraies ou pas, ou au contraire assez complexes, mais qui reste toujours approximatif. Un tel modèle est très sensible aux variations des paramètres électromagnétiques et mécaniques qui varient avec la température, la fréquence de fonctionnement, le point d'opération, le vieillissement et la procédure de maintenance de la machine.

La sensibilité de ces estimateurs de vitesse aux variations paramétriques est la source d'erreurs d'oscillations particulièrement en régime transitoire au niveau de la boucle de régulation de la vitesse. Dans le cas de fonctionnement à basse vitesses, une variation de la résistance statorique provoque une réduction du couple maximal délivré par la machine. La variation de la résistance rotorique modifie la constante de temps rotorique ce qui provoque une dégradation de la réponse des correcteurs (contrôle vectoriel à flux rotorique) [ILA 94].

En ce qui concerne les approches d'estimation basées sur la pulsation de glissement, les fréquences de commutation des convertisseurs sont calculées à partir de la fréquence de glissement qui est à son tour déterminée en fonction des paramètres de la machine et des courants statoriques comme le montre la figure 1.11. La vitesse est indirectement calculée dans ce cas avec la fréquence de glissement. Cet estimateur, bien qu'il soit élaboré avec des algorithmes simples et rapides, n'est pas robuste et pour cette raison son fonctionnement est limité au régime nominal [NAK 88].

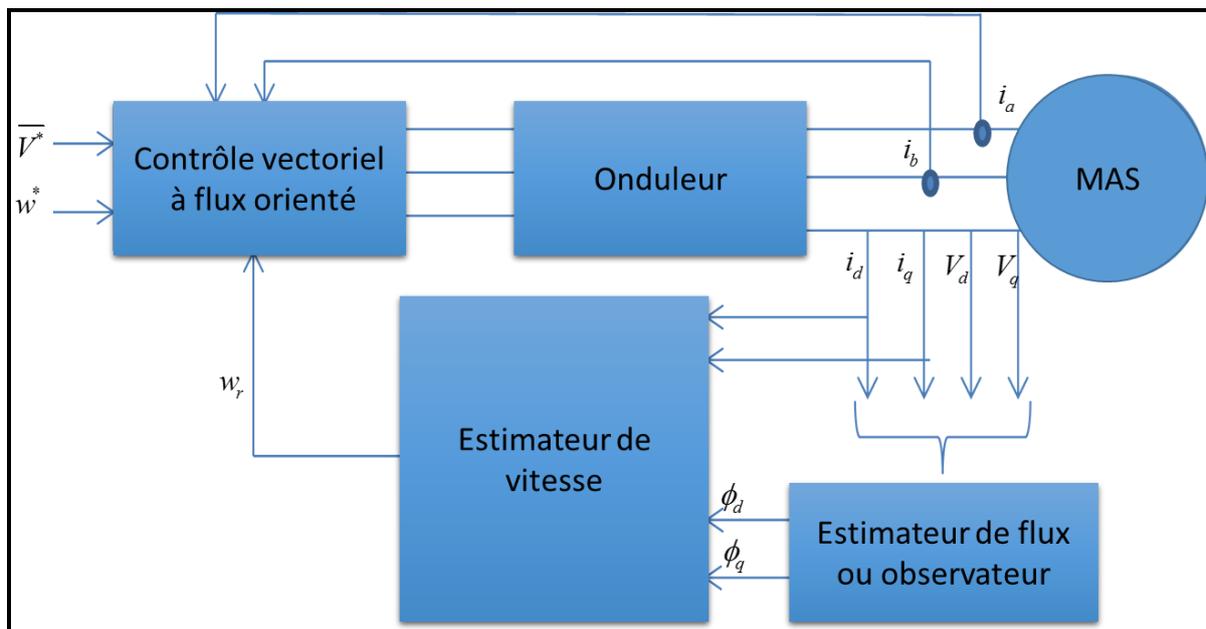


Figure 1. 9 Diagramme relatif de l'estimateur de la vitesse

Le principe de la technique de commande directe du couple est basé essentiellement sur une utilisation dans un contrôleur à hystérésis pour avoir une sortie à modulation de largeur d'impulsion. En effet, les valeurs instantanées du flux statorique et du couple sont déterminées à partir des tensions et des courants statoriques. Cette technique est caractérisée par la réponse rapide de son couple avec une faible perte de commutation. Les limites de cette technique sont liées principalement aux opérations d'intégration nécessaires pour le calcul du flux qui donne des résultats médiocres surtout pour les faibles vitesses. La méthode de régression linéaire a été utilisée dans [FAI 95] pour l'estimation de la vitesse. L'algorithme de régression linéaire est caractérisé par sa simple implantation, surtout en temps réel. Cependant son problème majeur est lié essentiellement aux opérations d'intégration et de dérivation requise sur les signaux. Des algorithmes et

des filtres à moindres carrés peuvent être utilisés pour l'estimation de la vitesse de rotation [PRO]. Cet estimateur est très sensible à la variation de la résistance statorique qui affecte considérablement les résultats d'estimation.

Le principe de fonctionnement d'un estimateur de vitesse basé sur les systèmes adaptatifs avec modèle de référence consiste à une comparaison entre les sorties de deux modèles distincts. Le premier est celui de référence où la variable à estimer n'est pas impliquée. Le deuxième représente le modèle ajustable contenant la variable à estimer. L'erreur entre les sorties des deux modèles est utilisée pour la détermination du mécanisme d'adaptation convenable. La vitesse est donc calculée à partir de l'erreur entre les deux modèles. Cette technique présente l'avantage de sa faible sensibilité aux variations paramétriques de la machine.

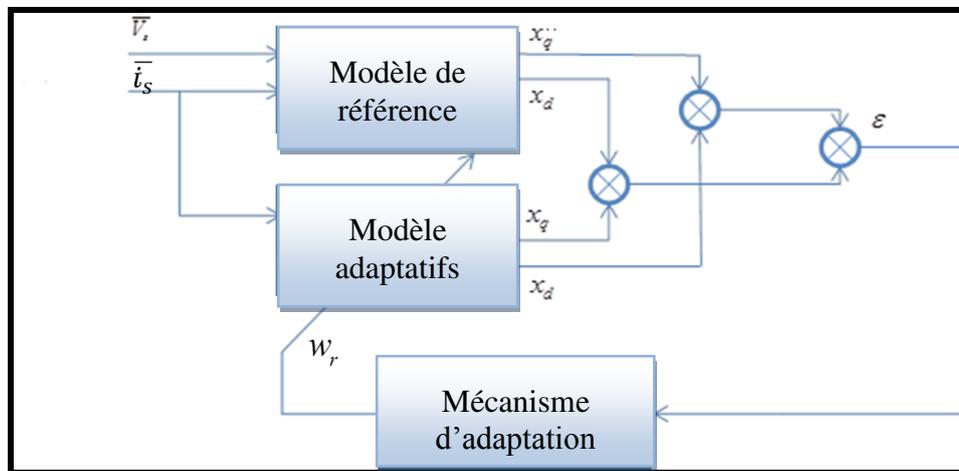


Figure 1. 10 Modèle de référence relatif à un système adaptatif

Dans le cas des méthodes d'estimation de la vitesse par observateur déterministe, il est préférable de disposer des équations de la machine sous forme linéaire. Ces équations requièrent une linéarisation des équations réelles autour d'un point de fonctionnement ou une décomposition du système en sous-systèmes ayant des constantes de temps différentes. Les observateurs d'état possèdent une bonne dynamique, et permettent d'avoir des résultats précis, mais, ils sont caractérisés par leur faible robustesse vis-à-vis des variations paramétriques. Le filtre de Kalman est considéré comme étant un observateur stochastique, il est utilisé pour l'estimation de la vitesse et du flux [TAN 87],

Cependant, ce dernier présente certains inconvénients limitant son utilisation comme les problèmes de convergence, la sensibilité vis-à-vis des variations paramétriques et le manque de robustesse. De plus, ce type d'observateur est trop gourmand en temps de calcul et il est difficile à implanter.

Une simple illustration de son principe de fonctionnement est donnée dans la figure 1.10

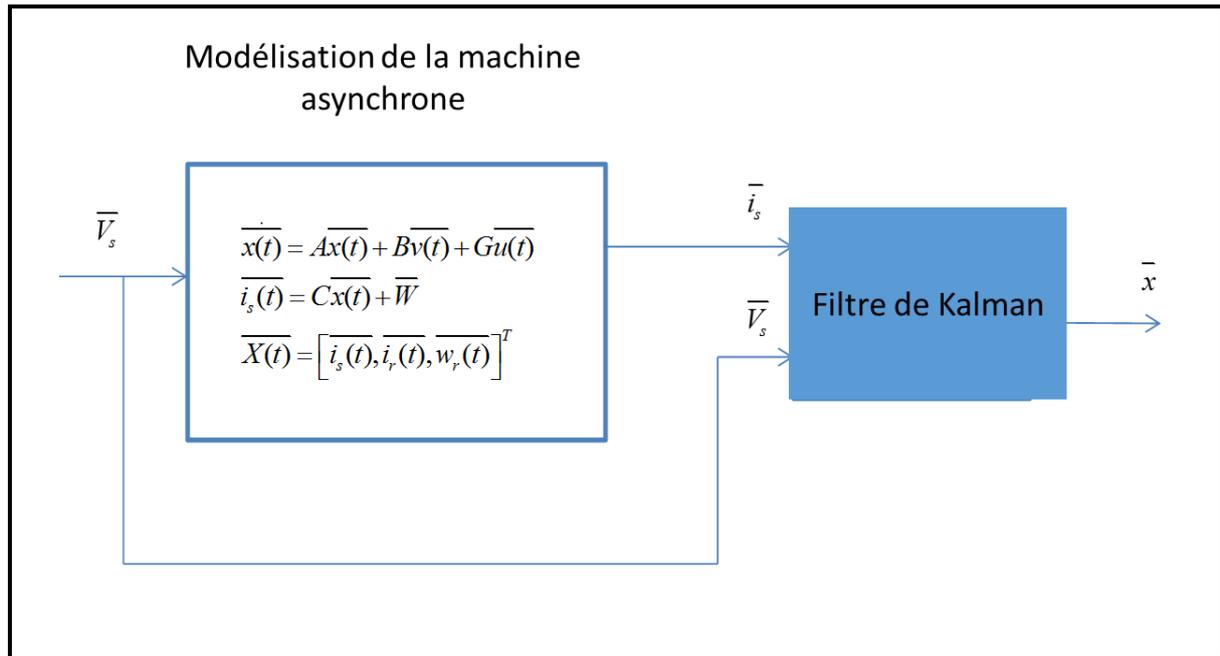


Figure 1. 11 Technique de l'estimation de la vitesse par filtre de Kalman

D'une manière générale, les estimateurs basés sur le modèle de la machine donnent de bons résultats dans certains cas. Cependant, leurs performances statiques et dynamiques varient considérablement d'une approche à l'autre. Ils sont sensibles aux variations paramétriques et ils présentent des erreurs de modélisation et d'approximations qui sont considérées parfois importantes [LEE 92][Shi 00].

1.3.2.3. Les Techniques basées sur les méthodes de traitement de signal

- **Les techniques basées sur l'injection d'un signal à haute fréquence**

Cette approche a comme objectif d'injecter un signal à haute fréquence au niveau des tensions statoriques à basse fréquence. En effet, les signaux injectés, vu la saillance du rotor de la machine produisent des courants à Haute Fréquence (HF) qui sont modulés en amplitude. Ses derniers n'affectent pas le comportement de la machine. Une démodulation du signal de la tension statorique à Haute Fréquence permettra l'extraction des informations sur la position du rotor. Cette technique requiert une utilisation des fréquences de commutation élevées au niveau des

convertisseurs statiques pour l'injection des signaux HF. Cependant, son inconvénient réside dans l'estimation, à partir des courants supplémentaires, effectués à partir des mesures disponibles au stator. Cela limite la robustesse de l'estimation qui n'est pas donc garantie dans ce cas.

- **Les méthodes basées sur les harmoniques d'encoches**

Cette technique est relativement simple. Elle se base sur l'analyse du contenu spectral des courants statoriques pour l'estimation de la fréquence des harmoniques contenant l'information sur la vitesse. Cette méthode est indépendante de la géométrie de la machine et elle est, d'autre part, insensible aux variations paramétriques, ce qui est considéré comme un avantage par rapport aux autres approches qui sont basées sur le modèle dynamique de la machine. Cependant, ses limites sont reliées essentiellement aux exigences des circuits de filtrage ainsi qu'aux performances dynamiques [JOV 07].

- **Les méthodes basées sur les techniques d'Intelligence Artificielle (IA)**

Dans la littérature plusieurs travaux sont menés pour l'estimation de la vitesse et d'autres variables avec des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) [VAS 97]. Cette estimation est basée sur l'apprentissage comme étant une opération remplaçant la modélisation pour le cas des estimateurs basés sur les modèles dynamiques. D'une manière générale les RNA sont caractérisés par leurs énormes capacités de calcul. Ils peuvent réaliser des opérations en parallèle et estimer avec précision les différentes variables d'états. Les performances d'un RNA dans l'estimation de la vitesse ou du flux de la machine sont autant plus élevées que la base de données d'apprentissage est riche. En effet, il a été prouvé que cette technique est fiable et robuste vis-à-vis d'une variation paramétrique [MRA 01].

1.4. METHODE PROPOSEE POUR LA DETERMINATION DE LA VITESSE DANS UNE APPLICATION EMBARQUEE

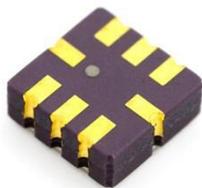
Les applications sans fil mobiles nécessitent l'appel à une technologie de capteur intégrable, de petite taille, de faible poids, ayant une haute performance, à faible coût et capable de fournir une mesure fiable de la vitesse. Plusieurs travaux ont été effectués sur l'utilisation des accéléromètres en technologie MEMS (Systèmes Micro-Electro-Mécaniques) dans les machines électriques tournantes pour des applications filaires ou sans fils. Ces dispositifs sont généralement employés pour la détermination de la vitesse des dispositifs tournants tel que proposé par [BAG 10], ou aussi pour la surveillance des vibrations [SUB 14] et le

diagnostic des défauts mécaniques [MAR 15]. Il sera noté qu'un choix sera porté sur les accéléromètres en technologie MEMS pour la détermination de la vitesse et la surveillance de la machine électrique tournante. Ces dispositifs seront exploités au niveau du prochain chapitre.

1.5. CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, les différentes méthodes de mesure de vitesse d'une machine électrique tournante ont été présentées à savoir les méthodes directes et indirectes. Les limites des solutions existantes en termes de robustesse, de sensibilité et de fiabilités ont été bien soulignées. Ces dernières ne répondent pas aux besoins des applications embarquées en termes de miniaturisation et de la faible consommation de l'énergie électrique donc un appel à une nouvelle solution de mesure de la vitesse basée sur les accéléromètres capacitifs de technologie MEMS sera abordée dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE 2 : NOUVELLE
APPROCHE POUR LA MESURE DE
LA VITESSE DE ROTATION IN SITU
D'UNE MACHINE ÉLECTRIQUE
TOURNANTE**



Résumé

Au cours de ce chapitre les accéléromètres en technologie Micro-Systèmes-Electro-Mécaniques (MEMS) seront introduits comme étant une nouvelle solution de mesure de vitesse d'un actionneur tournant bénéficiant d'une extrême miniaturisation et ayant une faible consommation. Ainsi, vu les caractéristiques, de ces dispositifs, ils ont été choisis comme étant les meilleurs candidats pour une application sans fil qui sera envisagée ultérieurement.

Cependant, le fait que les grandeurs mesurées soient issues de l'accélération d'une petite masse intégrée dans le composant, elles requièrent une mise en place d'algorithmes de traitement pour extraire la vitesse de rotation du moteur. Deux procédures de détermination de la vitesse via ces dispositifs seront présentées au cours de ce chapitre. La première basée sur la redondance matérielle des accéléromètres MEMS et la seconde méthode consiste à l'utilisation d'une variance connue sous le nom de VARIANCE D'ALLAN. Ces deux solutions seront détaillées et les résultats trouvés par simulation et par expérimentation seront illustrés.

Un choix sera effectué pour l'une de ces méthodes et sera adoptée dans la suite de cette étude.

Sommaire

2.1. INTRODUCTION	29
2.2. GENERALITES SUR LES MICROSYSTEMES ELECTROMECHANIQUES (MEMS)	30
2.2.1. Introduction	30
2.2.2. Historique.....	30
2.3. MARCHE DES MEMS	31
2.4. ACCELEROMETRES EN TECHNOLOGIE (MEMS)	31
2.5. PROCEDURE DE FABRICATION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	32
2.5.1. Modélisation mécanique	33
2.5.2. Schéma synoptique du capteur	34

2.6. DETERMINATION DE L'ANGLE DE DEVIATION DE L'ACCELEROMETRE EN TECHNOLOGIE MEMS	38
2.7. PRINCIPE DE DETERMINATION DE LA VITESSE AVEC DES ACCELEROMETRES EN TECHNOLOGIE MEMS	39
2.7.1. Redondance matérielle des accéléromètres MEMS.....	39
2.7.1.1. Etude théorique	39
2.7.1.2. Résultats de simulation.....	43
2.7.1.2.1. Fonctionnement à vitesse constante	44
2.7.1.2.2. Fonctionnement à vitesse variable.....	46
2.7.1.3. Etude expérimentale	47
2.7.1.3.1. Acquisitions des données	47
2.7.1.3.2. Localisation des capteurs.....	48
2.7.1.3.3. Calibrage.....	48
2.7.1.3.4. Détermination de la vitesse	49
2.7.2. Utilisation de la variance d'Allan pour la détermination de la vitesse	50
2.7.2.1. Variance d'Allan.....	50
2.7.2.2. Corrélation entre la variance d'Allan et la vitesse de rotation	52
2.8. CONCLUSION	53

2.1. INTRODUCTION

Actuellement, l'avancement technologique en termes de performances et de miniaturisation, a donné naissance à une nouvelle technologie de capteurs nommée Micro-Systèmes-Electro-Mécaniques (MEMS) présentant une technologie issue des circuits intégrés pour élaborer des structures micromécaniques associées à l'électronique. La connaissance des différentes propriétés électriques et mécaniques des technologies MEMS, et les recherches avancées récemment menées ont conduit à une évolution de leur utilisation dans les systèmes embarqués où la miniaturisation et la faible consommation sont les critères de choix fondamentaux.

De nos jours, les capteurs de technologie MEMS sont présents dans plusieurs domaines à savoir l'automobile [DAV 98], la médecine, le domaine militaire [TAN 05], et en général les systèmes d'entraînement électriques [BAG 10]. L'utilisation de ces capteurs dans les machines électriques offre de nouvelles perspectives de contrôle et de surveillance.

En effet, associé à une unité de transmission, les capteurs offrent une solution complète de communication à distance. Le présent travail est situé dans ce contexte où les accéléromètres MEMS sont utilisés pour la mesure de la vitesse de rotation angulaire d'une machine tournante en vue de leur utilisation par la suite pour un contrôle intelligent des actionneurs tournants. L'objectif principal de cette étude consiste à améliorer la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des machines électriques tournantes.

Ce chapitre sera organisé comme suit ; après un bref descriptif des capteurs en technologie MEMS et une présentation détaillée de leur principe de fonctionnement, une nouvelle approche de mesure de la vitesse basée sur l'utilisation des accéléromètres ADXL 203 sera abordée. La solution proposée sera développée et les résultats trouvés seront bien détaillés justifiant ainsi le choix effectué pour cette application.

2.2. GENERALITES SUR LES MICROSYSTEMES ELECTROMECHANIQUES (MEMS)

2.2.1. Introduction

D'une manière générale un système MEMS est un microsystème électromécanique contenant un ou plusieurs éléments mécaniques, dont l'objectif est de réaliser une fonction de capteur ou d'actionneur avec des structures de dimensions micrométriques. Les composants sont réalisés à base de silicium en micro technologie [3]. La partie électronique est conçue avec des outils de fabrication de circuits intégrés. Cependant, les structures mécaniques, de très faibles dimensions, sont construites à base du silicium. L'alliance de la technologie de micro-usinage avec la microélectronique permet d'avoir des systèmes sur une puce complète d'une taille réduite d'un millimètre carré [JUD 01].

2.2.2. Historique

Depuis les années 1970, date de sa première apparition, la technologie MEMS ne cesse de se développer pour répondre aux exigences industrielles et technologiques souhaitées. Au début des années 1990, elle est devenue un produit commercialisé notamment pour les applications automobiles et les périphériques informatiques, à savoir les cartouches d'imprimante à jet d'encre [6]. Ensuite, elle a été utilisée dans le domaine militaire, particulièrement dans les applications aérospatiales. Cette évolution a permis d'augmenter leur pertinence dans le marché d'une part et d'avoir des investissements importants d'autre part.

Les principales étapes d'évolution des capteurs en technologie MEMS en termes d'application et de miniaturisation sont illustrées au niveau de la figure 2.1.

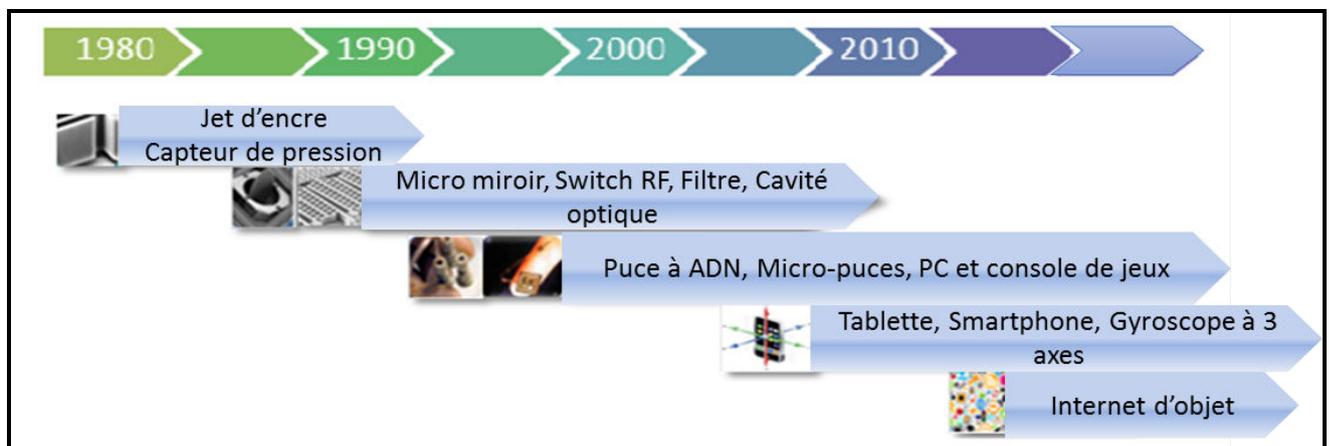


Figure 2. 1 Evolution des applications de la technologie MEMS

2.3. MARCHÉ DES MEMS

Grâce aux innovations continues et aux efforts considérables pour la réduction de la taille, la minimisation de la consommation d'énergie et la diminution du coût, les capteurs de technologie MEMS ont trouvé leurs chemins partout, dans les automobiles, les téléphones et les ordinateurs portables etc... Cette évolution a été soulignée par l'augmentation du chiffre d'affaire des entreprises travaillant dans ce domaine. Selon [IHS 13]. Un taux de croissances de plus de 10% par an du chiffre d'affaire de ces entreprises a été estimé. Selon des prévisions de marché, ce taux sera conservé pour sept années successives ce qui va conduire à une augmentation du marché jusqu'à 11.4 milliards de dollars d'ici l'année 2017. Selon la même source, 4,3 milliards de capteurs micromécaniques ont été vendus en 2011 avec une augmentation de 9,8 milliards de capteurs en 2015. L'histogramme décrit selon la figure 2.2 illustre l'évolution des bénéfices et des chiffres d'affaires des entreprises travaillant dans le secteur des MEMS couvrant la période [2006 2017]

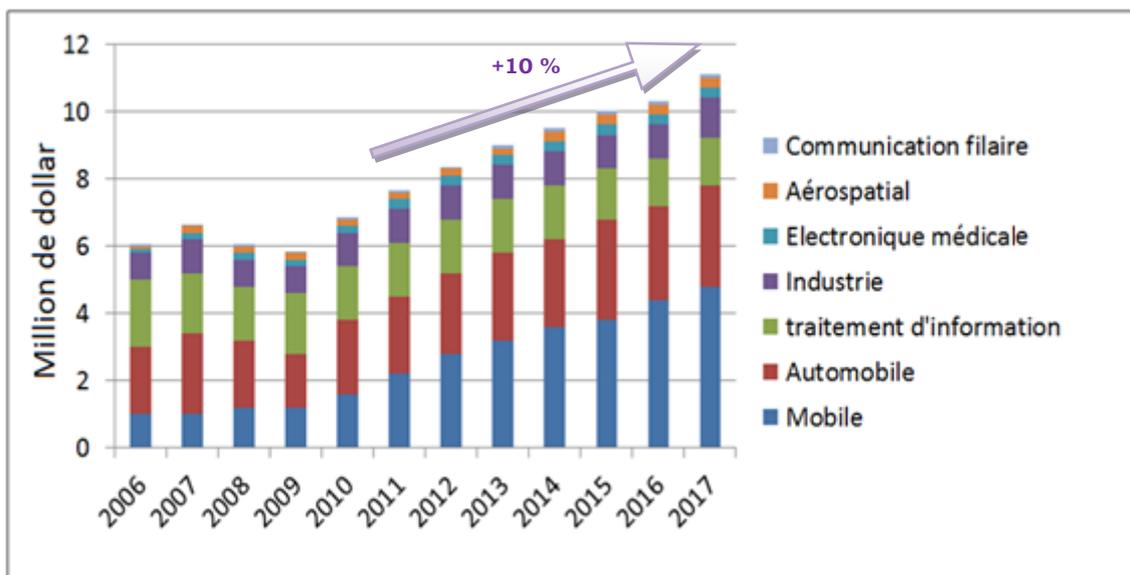


Figure 2. 2 Marché des MEMS par secteur industriel 2006-2017 [Bou 2013]

2.4. ACCÉLÉROMÈTRES EN TECHNOLOGIE (MEMS)

Les accéléromètres de technologie MEMS sont parmi les capteurs les plus utilisés. Ils bénéficient à la fois d'une extrême miniaturisation et d'un bon rapport performance/coût du fait de leurs capacités à être produits en série [1]. Deux types d'accéléromètres sont fréquemment utilisés à savoir les accéléromètres à effets piézo-électriques et ceux capacitifs. En effet, des études ont été effectuées pour comparer les performances de ces deux types. Elles ont souligné la meilleure

sensibilité des capteurs capacitifs par rapport aux autres types [SHA 08]. Contrairement aux accéléromètres piezo-resistifs qui nécessitent une entrée dynamique avec une certaine fréquence pour générer un signal, les capteurs capacitifs permettent d'obtenir une plus large gamme de température de fonctionnement sans compensation, assurant ainsi le suivi des entrées dynamiques et statiques. La figure 2.3 souligne la prédominance des accéléromètres capacitifs par rapport aux autres types d'accéléromètres pendant l'année 2009 [WTC 09]. C'est une des raisons pour laquelle nous avons opté pour les accéléromètres capacitifs lors de notre étude

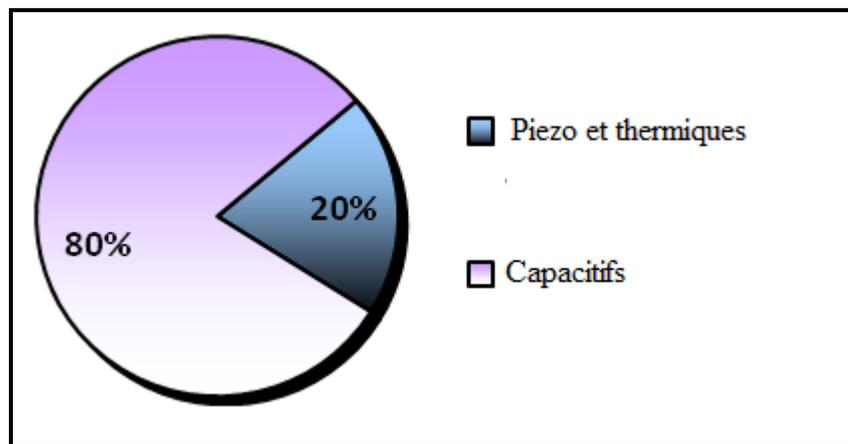


Figure 2. 3 Marché des accéléromètres par technologie [WTC 09].

2.5. PROCEDURE DE FABRICATION ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Pour cette étude, nous avons choisi l'accéléromètre capacitif de la série ADXL d' Analog Device pour la mesure de la vitesse d'une machine tournante. La procédure de fabrication, les caractéristiques du capteur et son modèle seront l'objet de la suite de ce chapitre. Les accéléromètres ADXL sont réalisés sur une surface de silicium avec des techniques très spécifiques à savoir le micro-usinage des couches et la photolithographie. Ces techniques permettent de créer des structures microscopiques de 1 à 100 micromètres en silicium (micro-poutres, micro-lames et micro-ressorts) comme le montre la figure 2.4. La masse sismique représentée sur cette figure présente la partie centrale dont on étudie le mouvement et qui subit l'effet d'accélération. Elle est reliée au bâti par des micro-poutres pour les systèmes à un seul axe ou par des micro-ressorts pour celui à deux axes permettant ainsi de diriger son mouvement. Cette partie mobile est sensible à la variation des grandeurs physiques (vitesse, accélération, température,..) et cette variation sera traduite grâce à la partie électronique du MEMS en une grandeur

électrique. Le déplacement de la masse est suivi par un capteur capacitif organisé autour des lamelles [1].

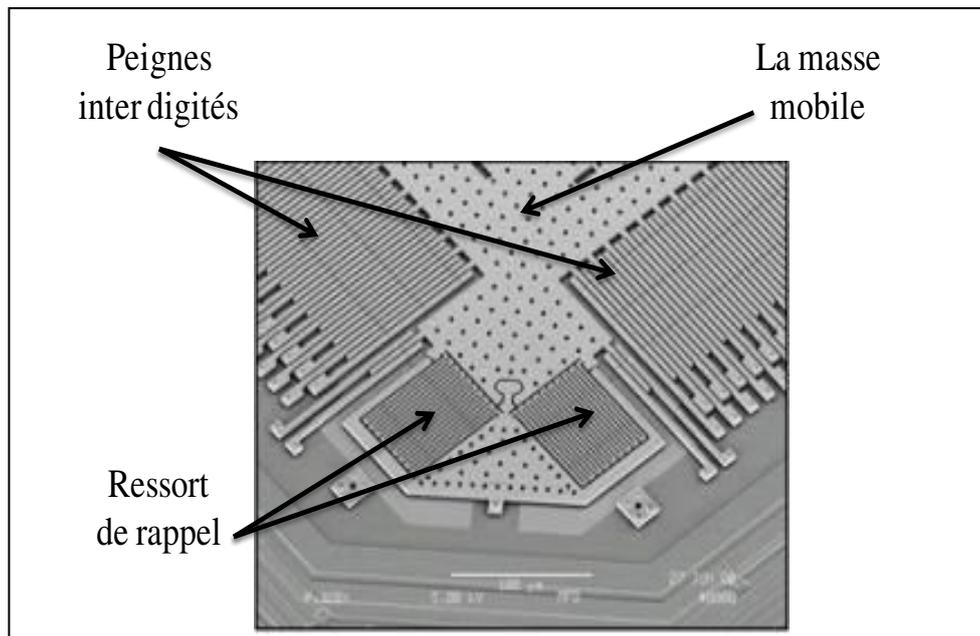


Figure 2. 4 Composition d'un accéléromètre type ADXL202 à deux axes

Une description plus détaillée sur la structure particulière des lamelles en forme de peignes digités interpénétrés est présente sur la figure 2.5.

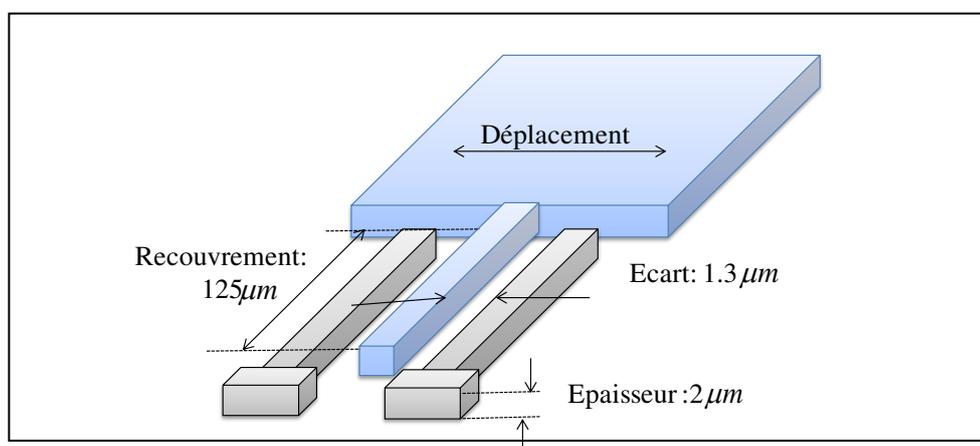


Figure 2. 5 Description des lamelles associées à un capteur MEMS

2.5.1. Modélisation mécanique

A titre simplificatif, le capteur peut être modélisé par sa masse sismique (m) posée sur un plan horizontal. Cette masse, étant solidaire à une lame, peut se déplacer le long de l'axe x entre deux faces (Face₁ et Face₂) comme le montre la figure 2.6. Chaque paire de faces (1 et 2) crée un condensateur de capacité dépendant de L .

En effet, la liaison entre cette masse et le support est assurée grâce à un système (ressorts/amortisseurs) présentant ainsi le comportement mécanique du capteur.

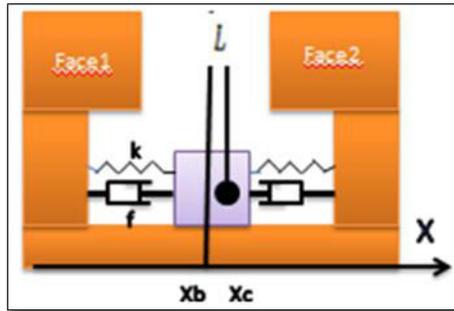


Figure 2. 6 Modèle mécanique d'un accéléromètre MEMS

Soit X_c la position du centre de masse et X_b sa position de repos relative au support. Une étude des mouvements et une analyse des forces appliquées sur le capteur permettront la détermination de la valeur du vecteur d'accélération. En effet, l'application du principe fondamental de la dynamique permet d'aboutir à la relation reliant les forces appliquées et la valeur du vecteur d'accélération absolue décrite selon 2.1

$$\sum \vec{F}_{\text{appliquée}} = m \cdot \vec{a}_a \quad 2.1.$$

Une projection des forces sur un même axe mènera par la suite à la détermination de la relation entre le déplacement des lamelles des capteurs différentiels L ($L = X_b - X_c$) et l'accélération

$$L \approx -\frac{m}{2k} \cdot a(t) \quad 2.2.$$

Donc mesurer le déplacement L des lamelles revient à mesurer l'accélération de la masse.

2.5.2. Schéma synoptique du capteur MEMS

Le modèle électrique du capteur utilisé dans ce travail (ADXL203) est constitué d'un amplificateur, d'un démodulateur et d'un filtre comme le montre la figure synoptique 2.7. En effet, la partie électrique permet de transformer le déplacement des lamelles en une tension exploitable au niveau de la sortie [1].

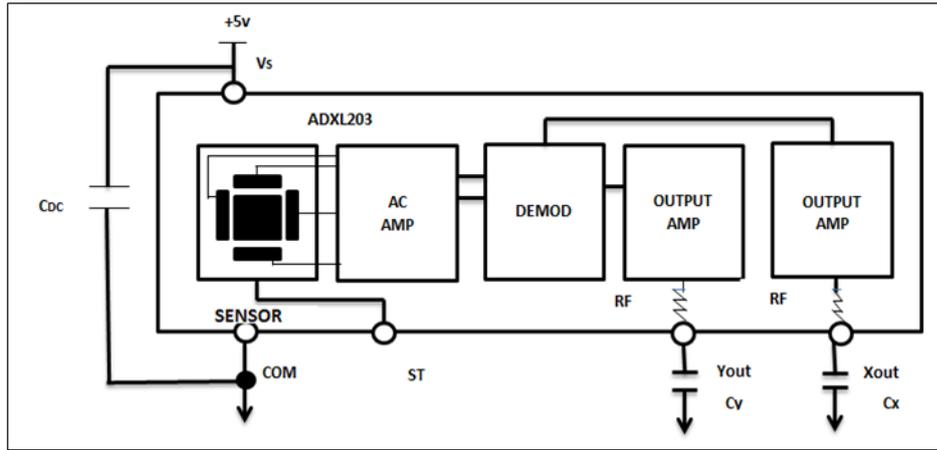


Figure 2. 7 Schéma fonctionnel de l'ADXL203 [1]

La modélisation du capteur illustrée sur la figure 2.7 montre qu'il est fixé à une lame pouvant se déplacer entre deux faces 1 et 2. Cette paire de faces définit deux condensateurs C_1 et C_2 . Un schéma d'interprétation détaillé est illustré au niveau de la figure 2.8 [ANA]. Il souligne la présence d'un oscillateur générant un signal carré d'horloge associé à un circuit de décalage de phase permettant de créer deux tensions V_1 et V_2 , dont la partie variable est en opposition de phase, alimentant les condensateurs C_1 et C_2 . D'autre part, une utilisation de deux résistances (R) est essentielle pour établir la tension en mode commun $\frac{V_S}{2}$.

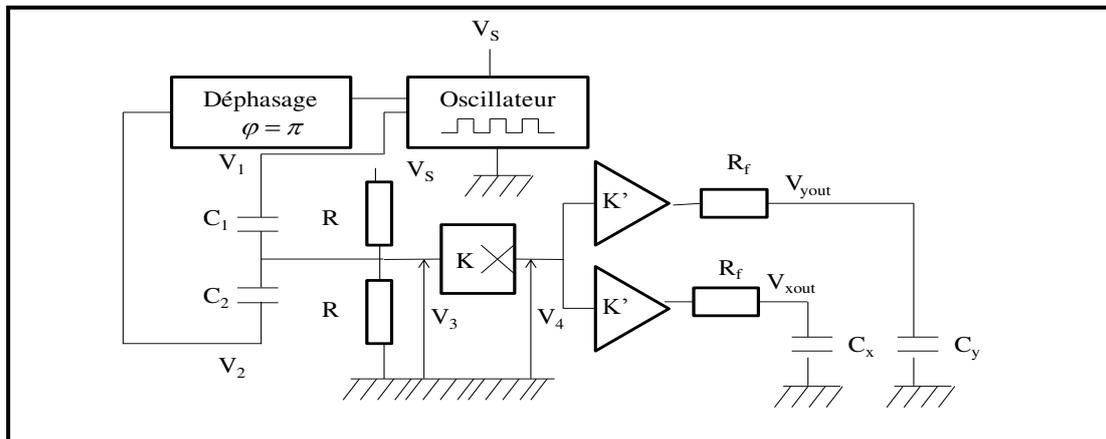


Figure 2. 8 Schéma d'interprétation détaillé du fonctionnement de l'accéléromètre ADXL 203[1]

La détermination de la tension V_3 est basée sur l'application de la loi des nœuds au niveau des branches ce qui aboutit à l'expression (2.3)

$$C_1 \frac{d}{dt}(V_3 - V_1) + C_2 \frac{d}{dt}(V_3 - V_2) + \frac{V_3 - V_s}{R} + \frac{V_3}{R} = 0 \quad 2.3.$$

Une simplification de l'équation (2.3) permet de trouver l'expression suivante

$$\frac{d}{dt}(V_3) + \frac{V_3}{\tau} = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \omega V_1 \cos(\omega t) + \frac{V_s}{2\tau} \quad 2.4.$$

Avec la constante de temps τ définie comme suit

$$\tau = \frac{R}{2}(C_1 + C_2) \quad 2.5.$$

En prenant en compte que la tension V_3 est obtenue selon l'équation suivante

$$V_3 = \frac{V_s}{2} + \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} V_1 \sin(\omega t) \quad 2.6.$$

Des capacités sont assimilées à des condensateurs plans (C_1 et C_2) qui sont définies respectivement selon les expressions (2.7) et (2.8)

$$C_1 = \frac{\epsilon S}{d + L} \quad 2.7.$$

$$C_2 = \frac{\epsilon S}{d - L} \quad 2.8.$$

En remplaçant les termes relatifs à C_1 et C_2 au niveau de l'expression (2.6), la tension V_3 s'écrit sous la forme (2.9)

$$V_3 = \frac{V_s}{2} - \frac{L}{d} V_1 \sin(\omega t) \quad 2.9.$$

Pour ne pas perdre l'information sur L , une démodulation synchrone est utilisée elle consiste en une multiplication du signal V_3 par le signal V_1 . Ensuite, cette multiplication est suivie d'un filtrage passe bas pour l'élimination des termes oscillants dépendant essentiellement de ωt , ce qui permet d'obtenir une forme générale du signal au niveau de sortie V_{xout} selon chaque axe et qui est décrit selon l'expression ci-dessous :

$$V_{xout} = K \times K' \times \frac{V_s}{2} + K \times K' \times \frac{m}{4kd} \times V_1^2 \times a(t) \quad 2.10.$$

En effet, d'une façon synthétique la tension de sortie de l'accéléromètre se présente sous forme affine tel que V_0 représente la tension de repos (c'est-à-dire celle mesurée en absence d'accélération) et S représente la sensibilité du capteur.

$$V_{out} \approx V_0 + S \times a(t) \quad 2.11.$$

Il faut noter que pour une alimentation du capteur de 5V, V_0 (tension de seuil) est égale à 2.5V [1]

L'ADXL 203 utilise la force de gravité comme stimulus. La figure 2.9 présente un suivi d'évolution des tensions de sortie du capteur en fonction de son orientation par rapport à la surface de la terre. Nous constatons que, lorsque le capteur est

parallèle à la surface de la Terre il subit un niveau de polarisation de (0 g) (correspondant à la tension du seuil qui est égale à 2.5V dans ce cas). Cependant, une rotation de 90° dans un sens horaire produira un champ de valeur +1g équivalent à une tension de 3.5V. La rotation dans le sens anti horaire produira un champ de -1g (tensions de 1.5V). Cela est bien souligné au niveau de la figure 2.9.

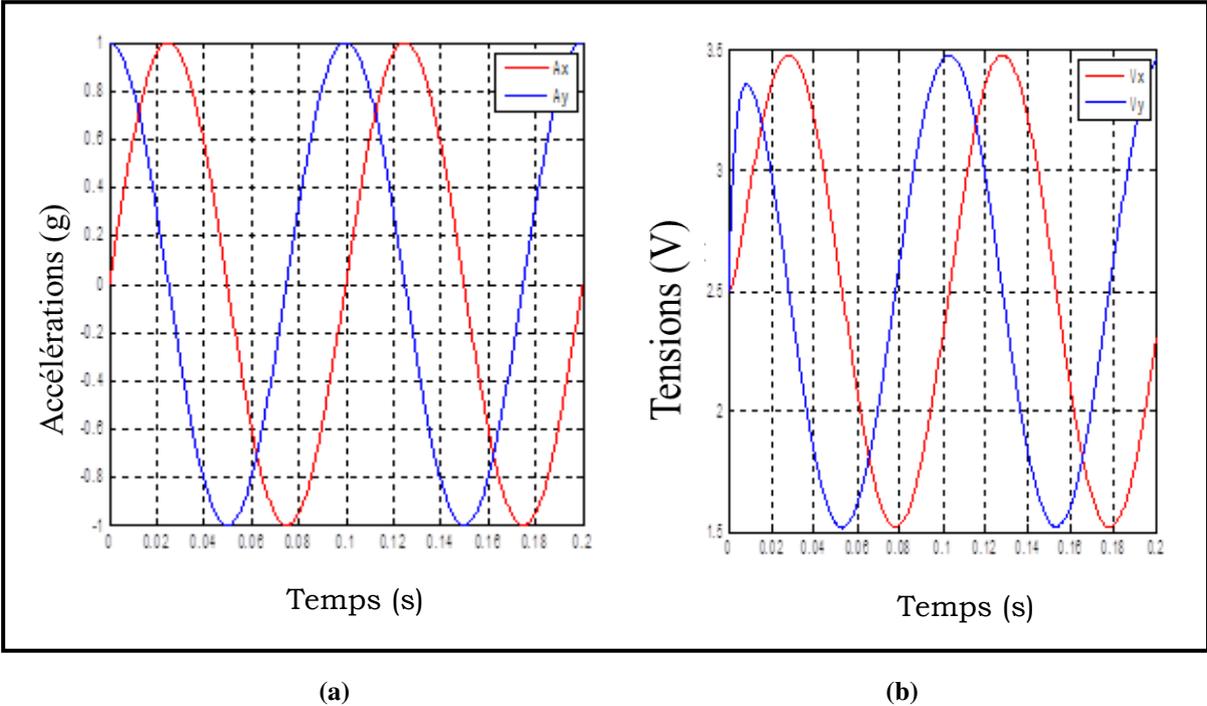


Figure 2.9 Evolution de l'accélération appliquée. b Evolution de la tension au niveau des sorties du capteur

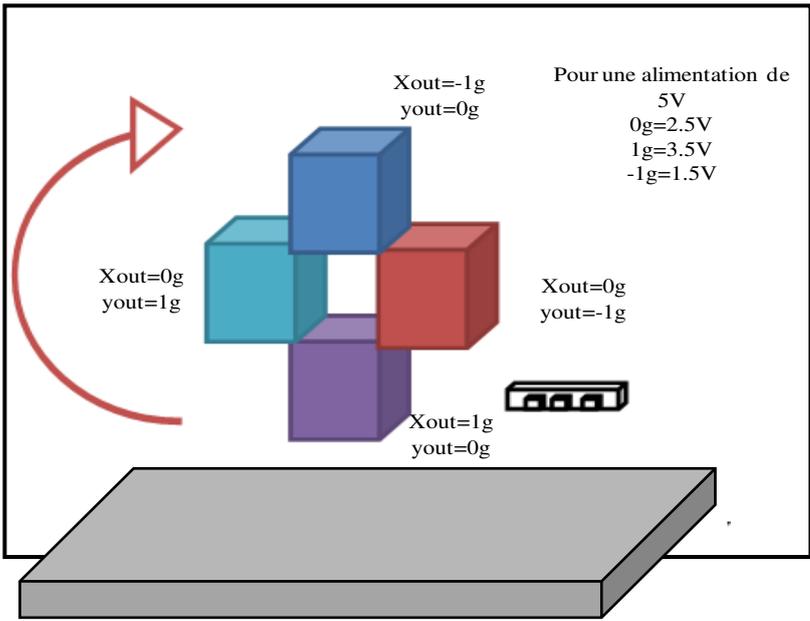


Figure 2.10 Variation de la sortie du capteur avec sa disposition par rapport à la surface de la terre

Un choix a été porté sur un capteur à deux axes vu les performances fournies en les comparant à celles retrouvées en utilisant un capteur à un seul axe. En effet, l'orthogonalité des axes permet d'augmenter la sensibilité du capteur (lorsque la sensibilité d'un axe diminue celle du deuxième augmente). En plus, ce dernier permettra la mesure de l'angle de déviation du capteur variant de 0 à 360° contrairement à celui d'un seul axe qui est limité à 180°. Ils permettent la localisation du capteur dans l'espace par détection du signe du signal de sortie comme le montre la figure 2.11

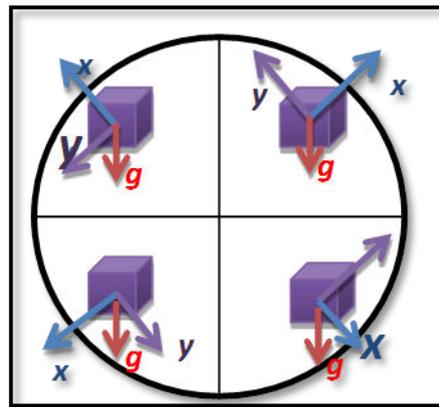


Figure 2. 11 Localisation du capteur dans les quatre quadrants

2.6. DETERMINATION DE L'ANGLE DE DEVIATION DE L'ACCELEROMETRE EN TECHNOLOGIE MEMS

La technologie MEMS représente une méthode très avantageuse pour la mesure de l'angle de déviation. Plusieurs travaux ont été menés dans ce contexte, à savoir ceux de [ALB 08]. Grâce à ce dispositif, la capacité de défiler, de faire tourner, d'incliner et de passer d'un écran horizontal du vertical est devenue très standard dans les tablettes et les Smartphones. Actuellement, tous les Smartphones contiennent au minimum un accéléromètre pour permettre la rotation d'écran. Par une simple action de l'utilisateur, le pivotement de 90° de l'image affichée sur l'écran ainsi que l'affichage des photos et des textes sur un écran plus large sont effectués.

Par la suite nous présenterons analytiquement la procédure du calcul de l'angle de déviation en utilisant l'accéléromètre choisi. Le capteur choisi délivre une force d'accélération dans les deux axes représentés comme suit :

$$A_x[g] = 1g \times \cos \theta \quad 2.12.$$

$$A_y[g] = 1g \times \sin \theta \quad 2.13.$$

Une simple opération de division entre (2.12) et (2.13) permet la détermination de $\tan \theta$ puis de θ présentant la déviation du capteur par rapport à la gravité comme le montre la figure (2.12)

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{A_y}{A_x}\right) \quad 2.14.$$

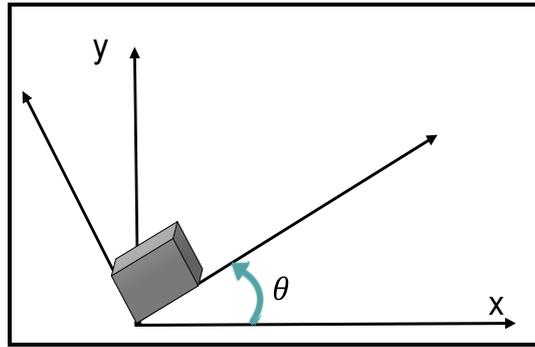


Figure 2. 12 Mesure de l'angle de déviation du capteur

2.7. PRINCIPE DE DETERMINATION DE LA VITESSE AVEC DES ACCELEROMETRES EN TECHNOLOGIE MEMS

2.7.1. Redondance matérielle des accéléromètres MEMS

La première méthode de détermination de la vitesse se base essentiellement sur une redondance matérielle des accéléromètres. Nous présentons dans ce paragraphe une étude théorique suivie de résultats de simulations

2.7.1.1. Etude théorique

Au cours de cette partie une étude analytique sera réalisée. Pour des raisons simplificatrices, des considérations ont été prises en compte. Elles consistent essentiellement à assimiler les capteurs à une petite masse (m) placée sur un plan incliné dans une position M du disque (O, r). Les différentes forces appliquées sont illustrées au niveau de la figure 2.13.

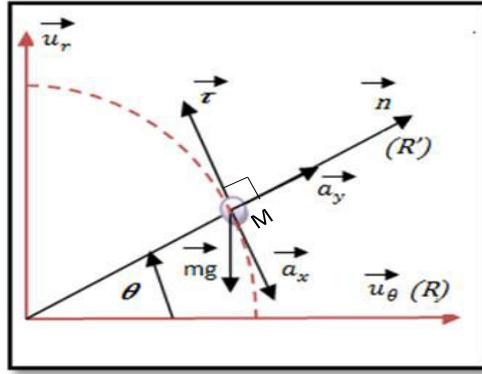


Figure 2. 13 Capteurs et différentes forces appliquées

Notons que $\vec{\tau}$ et \vec{n} représentent respectivement les vecteurs unités normal et tangential au point M.

Suite à l'application du principe fondamental de la dynamique décrit selon l'expression (2.1) le calcul du vecteur d'accélération absolue est achevé. Or, l'accélération absolue est représentée en fonction des différentes accélérations d'entrainements, de Coriolis et celles relatives. Ainsi, son calcul nécessite un appel aux vecteurs vitesses à savoir la vitesse d'entrainement, la vitesse absolue et celle relative sont illustrées respectivement selon les expressions suivantes :

$$\vec{V}_e = \vec{V}_{O/R'} + \overline{\Omega_{R'/R}} \wedge \overline{OM} \quad 2.15.$$

$$\vec{V}_a = \vec{V}_r + \vec{V}_e \quad 2.16.$$

$$\overline{V_{M/R}} = \overline{V_{M/R'}} + \overline{V}_e \quad 2.17.$$

Or O et M appartiennent au référentiel tournant R' d'où $\vec{V}_{O/R'} = 0$, $\overline{V_{M/R'}} = 0$ et $\overline{V}_r = 0$ ce qui permet d'écrire à une expression plus simple donnée ci-dessous :

$$\vec{V}_a = \vec{V}_e = \overline{V_{M/R}} = r\Omega\vec{\tau} \quad 2.18.$$

En plus, dans notre cas, l'accélération relative et celle de Coriolis sont considérées comme étant nulles étant donné que $\overline{V}_r = 0$ donc, $\overline{a}_c = 0$.D'où le vecteur d'accélération absolue est décrit comme suit

$$\vec{a}_a = r \frac{d\Omega}{dt} \vec{\tau} - r\Omega^2 \vec{n} \quad 2.19.$$

En se basant sur la loi de Newton, l'abscisse et l'ordonnée de la force résultante appliquée sont données par :

$$\begin{cases} F_x = -mg \cos \theta - mr \frac{d\Omega}{dt} \\ F_y = mg \sin \theta - mr\Omega^2 \end{cases} \quad 2.20.$$

A noter que F_x et F_y représentent les deux forces exercées sur la masse selon les deux axes x et y . Or l'ADXL 203 délivre une accélération dont les ordonnées sont décrites par le système (2.21) afin de s'opposer au mouvement de la masse

$$\begin{cases} a_x = g \cos \theta + r \frac{d\Omega}{dt} \\ a_y = -g \sin \theta + r\Omega^2 \end{cases} \quad 2.21.$$

La décomposition des sorties des accéléromètres selon les deux axes est illustrée au niveau de l'équation 2.21. Ces deux composantes soulignent la présence de la gravité dans les termes ce qui donne naissance à une composante sinusoïdale ainsi qu'un décalage de phase au niveau de la composante d'accélération. Afin de remédier à l'effet de la gravité, une approche a été proposée dans [BAG 10] et sera adoptée au cours de ce travail. Cette dernière consiste à placer deux accéléromètres en opposition de phase comme le montre la figure 2.14. Du fait que la sommation de la même composante d'accélération relative aux deux accéléromètres placés en opposition de phases permet l'élimination de la partie contenant le terme de la gravité g , cela mène à une expression simplifiée reliant l'accélération tangentielle et la vitesse

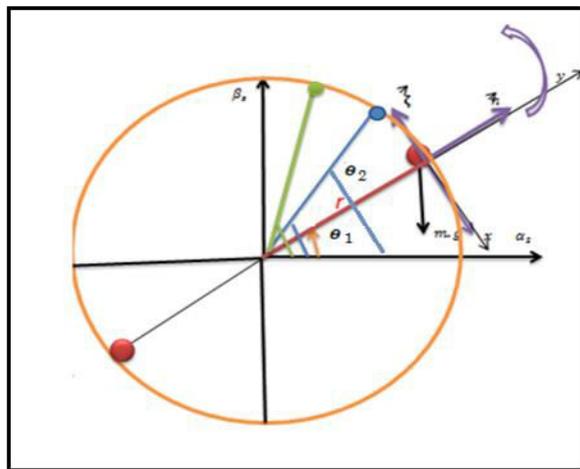


Figure 2. 14 Disposition des deux capteurs

$$\begin{cases} a_\tau = \frac{a_{x1} + a_{x2}}{2} = r \frac{d\Omega}{dt} \\ a_n = \frac{a_{y1} + a_{y2}}{2} = r\Omega^2 \end{cases} \quad 2.22.$$

Ensuite, une intégration de l'accélération conduit à la détermination de la vitesse

$$\Omega = \int \frac{1}{r} \times a_\tau \quad 2.23.$$

Nous avons testé le modèle pour la reconstitution de la vitesse et nous avons remarqué que les hypothèses sont valables uniquement pour le régime variable. En effet, si la vitesse est constante l'accélération tangentielle serait nulle relativement à l'équation (2.22).

Nous avons donc proposé un nouveau dispositif valable pour les vitesses variables ainsi que constantes : il s'agit d'un système composé de quatre capteurs dont le principe est basé sur le calcul de l'angle de déviation du capteur.

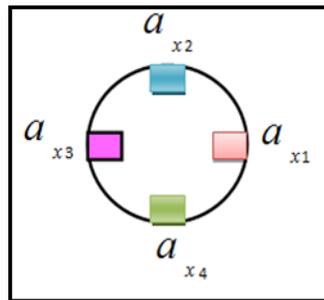


Figure 2. 15 Emplacement des capteurs sur l'axe de rotation du moteur

Dans le cas d'une vitesse constante, l'expression de la composante d'accélération selon l'axe x sera réduite à la relation (2.24). Donc, selon la variation de l'angle de déviation θ par rapport au temps nous pouvons alors déterminer la vitesse angulaire en module et phase. Les expressions relatives aux sorties des différents capteurs en fonction de l'angle de déviation θ seront représentées comme suit :

$$a_{x1} = g \cos \theta \quad 2.24.$$

$$a_{x2} = g \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) = g \sin \theta \quad 2.25.$$

$$a_{x3} = g \cos(\theta + \pi) = -g \cos \theta \quad 2.26.$$

$$a_{x4} = g \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) = -g \sin \theta \quad 2.27.$$

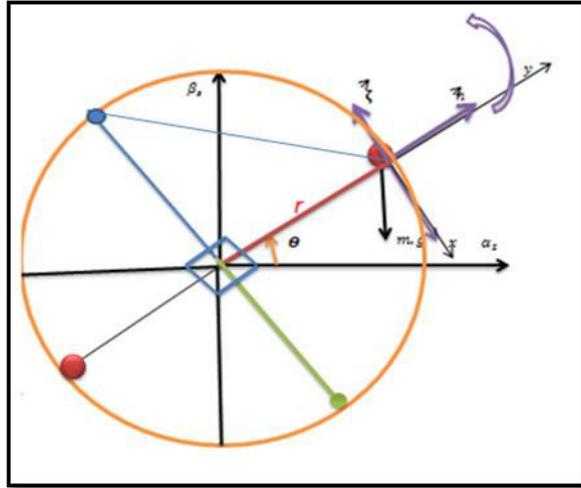


Figure 2. 16 Différentes forces appliquées sur un capteur en mouvement.

La méthodologie proposée sera détaillée dans le tableau 2.1

Table 2. 1. Approche proposée pour la détermination de la vitesse

Vitesse constante		Vitesse variable
$\frac{d\Omega}{dt} = 0$		$\frac{d\Omega}{dt} \neq 0$
Sens horaire	Sens anti horaire	
$\frac{a_{x2}}{a_{x1}} = \tan \theta$ $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$	$\frac{a_{x3}}{a_{x1}} = \tan \theta$ $\Omega = \frac{d\theta}{dt}$	$a_r = \frac{a_{x1} - a_{x4}}{2} = r \frac{d\Omega}{dt}$ $\Omega = \int \frac{a_r}{r} dt$

2.7.1.2. Résultats de simulation

Nous présentons dans la suite de ce paragraphe les résultats de simulation correspondants à deux types de fonctionnement

2.7.1.2.1. Fonctionnement à vitesse constante

L'évolution du signal d'accélération issue des quatre capteurs dans les deux sens sera présentée dans les figures 2.17 pour le sens trigonométrique et 2.18 pour le sens anti-trigonométrique. Les quatre capteurs génèrent des signaux sinusoïdaux déphasés de $\frac{\pi}{2}$ l'un par rapport à l'autre.

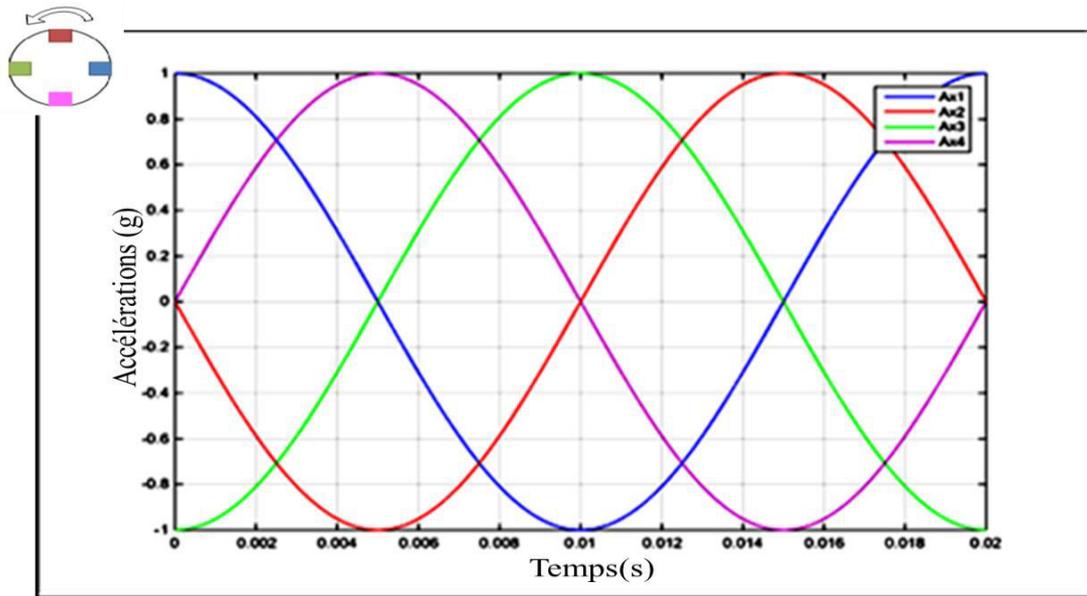


Figure 2. 17 Evolution de la tension de sortie des capteurs dans le sens trigonométrique de vitesse de rotation

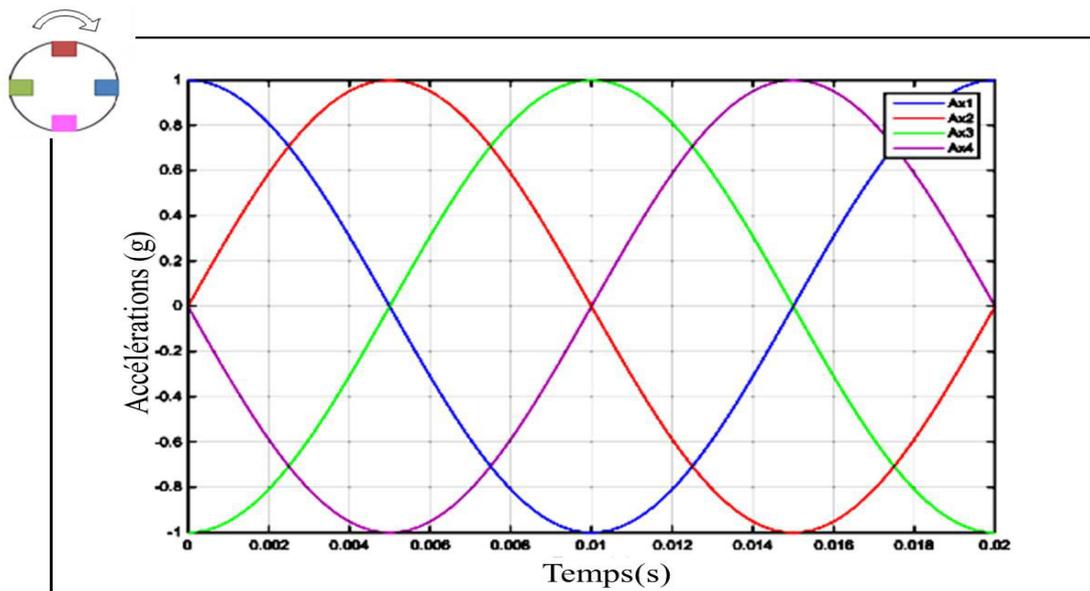


Figure 2. 18 Evolution de la tension de sortie des capteurs dans le sens anti-trigonométrique de vitesse de rotation

Ces figures représentent l'évolution de la position angulaire des quatre capteurs en fonction du temps dans les deux sens trigonométrique et anti trigonométrique. Le calcul de $\tan\theta$ et θ est effectué, ce qui permet le calcul de la vitesse. Les figures 2.19.a et 2.19.b présentent l'évolution des angles de rotation en modulo π .

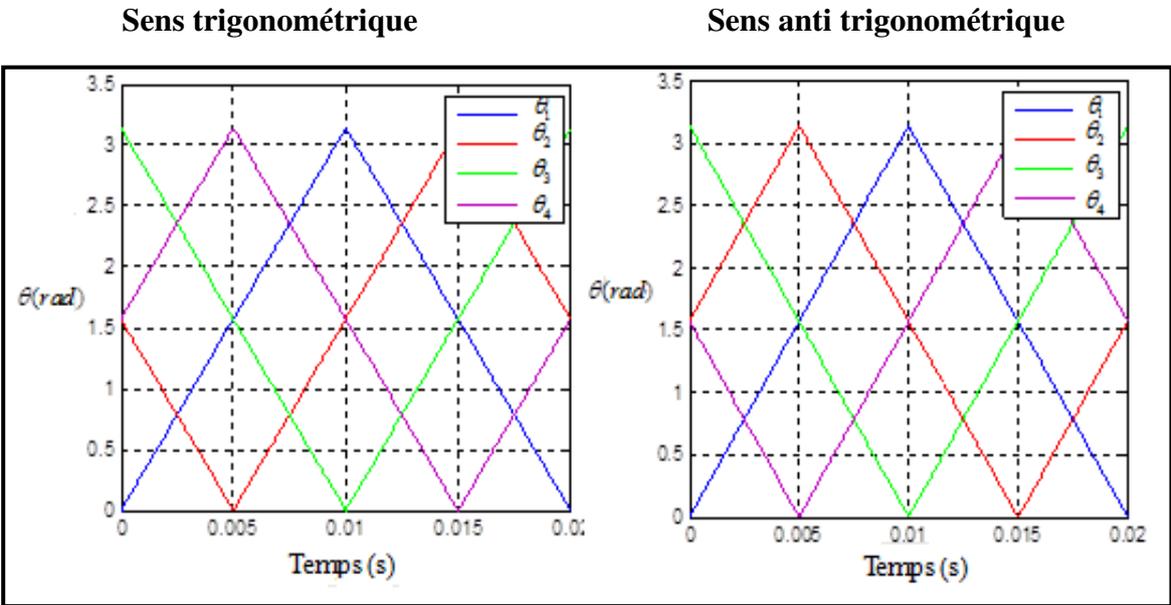


Figure 2. 19 Evolution de l'angle de rotation en fonction du temps pour les quatre capteurs

La vitesse ainsi déterminée est illustrée sur la figure 2.20 ce qui valide la méthode proposée. Cette étude a été menée par simulation et sans tenir compte des perturbations et des bruits qui entachent la mesure.

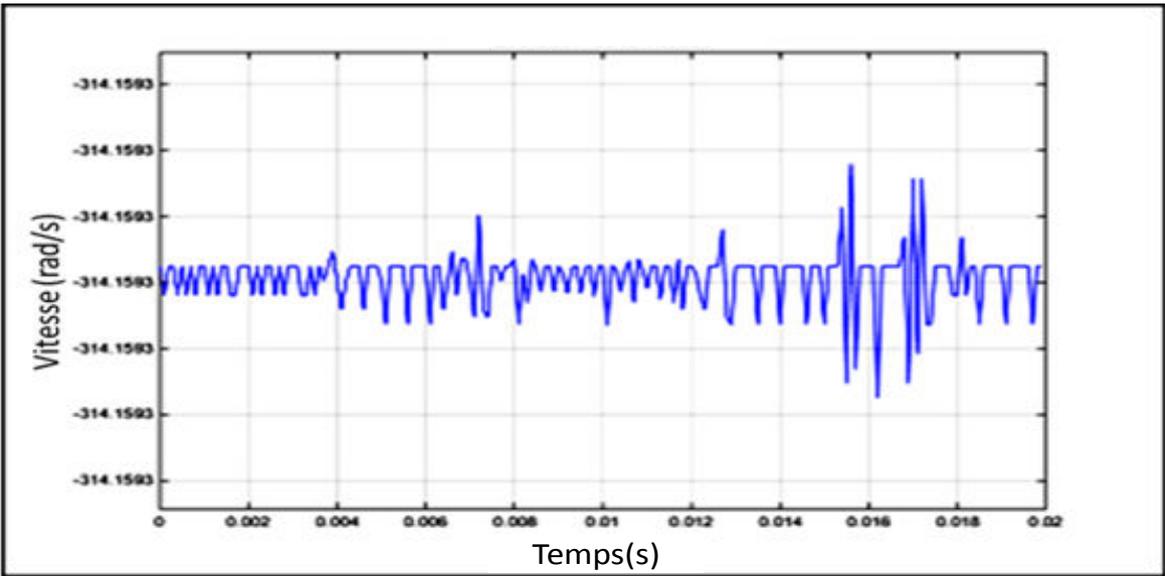


Figure 2. 20 Evolution de la vitesse en fonction du temps

Dans le cas réel, ce n'est pas toujours vrai, surtout avec la sensibilité du capteur aux bruits liés à l'environnement qui s'aggravent avec la dérivation ou l'intégration.

2.7.1.2.2. Fonctionnement à vitesse variable

Afin de tester la méthodologie proposée, une mise en oeuvre d'un programme sous Matlab Simulink a été effectuée. L'évolution des sorties des quatre capteurs ainsi que la valeur de la vitesse déterminée pour ce cas d'étude est illustrée selon la figure 2.21

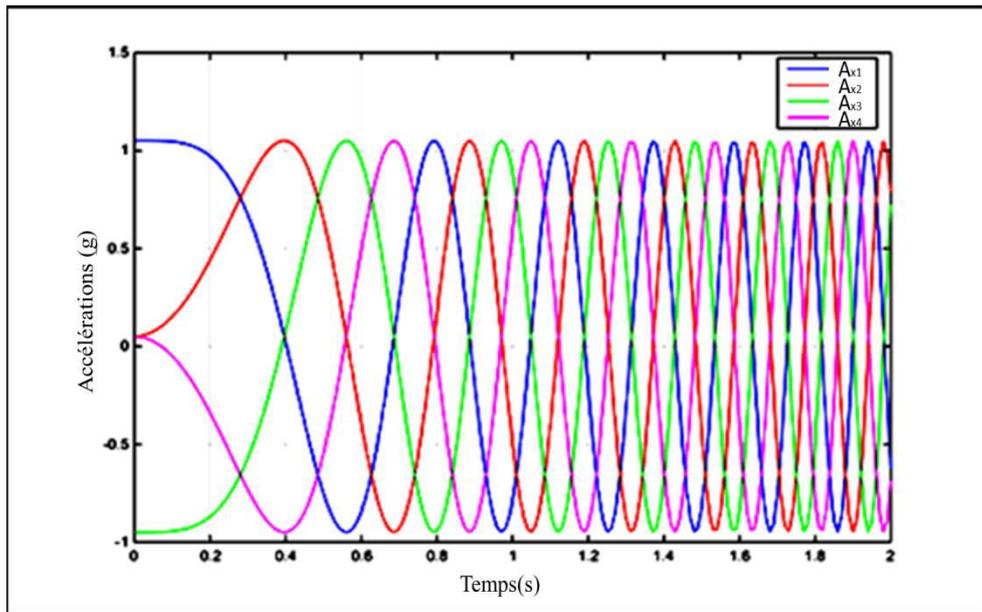


Figure 2. 21 Evolution des sorties des capteurs pour le cas d'une vitesse variable

A partir de ces sorties, la détermination de la vitesse a été réalisée et le résultat trouvé est illustré sur la figure 2.22

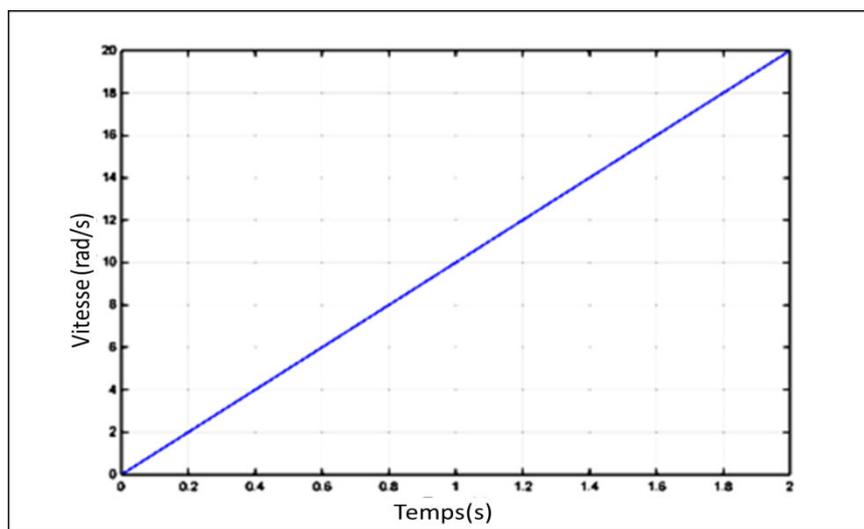


Figure 2. 22 Détermination de la vitesse

2.7.1.3. Etude expérimentale

Les différentes étapes effectuées pour le calcul de la vitesse sont illustrées sur l'organigramme de la figure 2.23. Nous commençons par une acquisition des données issues des capteurs. Ensuite nous passons à la localisation de ces derniers selon la valeur de la tension de sortie qu'ils délivrent. Cette étape sera suivie par un calibrage simple. Ensuite, à partir des sorties délivrées par les capteurs une détermination de l'angle de déviation sera faite pour calculer la vitesse de rotation du servo moteur.



Figure 2. 23 Organigramme de mesure de la vitesse

2.7.1.3.1. Acquisitions des données

Un « benchmark de test » a été conçu au laboratoire LAPLACE pour réaliser cette mission. Ce dernier est constitué d'un servo moteur (E604) et de quatre accéléromètres ADXL203 placés en quadrature de phase sur un circuit imprimé de forme circulaire fixé sur l'arbre de rotation comme le montre la photo.2.24

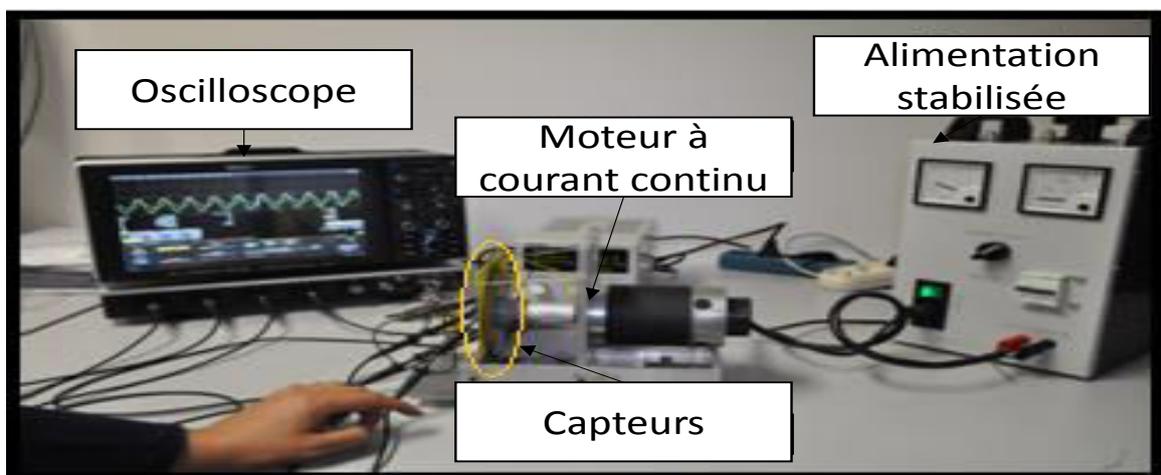


Figure 2. 24 Banc expérimental

2.7.1.3.2. Localisation des capteurs

Selon le signe de la tension qu'ils délivrent au niveau de leur sorties chaque capteur sera localisé dans le cadran qu'il lui convient comme le montre la figure 2.11

2.7.1.3.3. Calibrage

D'une façon générale, le calibrage présente un processus de comparaison de la sortie d'un instrument de mesure par rapport à une valeur de référence et la détermination des coefficients de l'équation de sortie pour avoir un signal de référence. Un calibrage hors ligne à deux positions a été utilisé.

Le modèle mathématique d'un accéléromètre peut être simplifié par la relation suivante

$$A = f \times A_m + b \quad 2.28.$$

Ainsi pour la détermination des valeurs de biais b et de facteur d'échelle f un alignement de cette dernière avec la gravité local est réalisé. La simplification des équations de sortie du capteur mène aux expressions suivantes

$$A_{+1g}[g] = b + (1g \times f) \quad 2.29.$$

$$A_{-1g}[g] = b - (1g \times f) \quad 2.30.$$

La détermination du biais et de l'offset est assurée grâce aux deux expressions 2.31 et 2.32

$$f = 0.5 \times \left(\frac{A_{+1g} - A_{-1g}}{1g} \right) \quad 2.31.$$

$$b = 0.5 \times (A_{+1g} + A_{-1g}) \quad 2.32.$$

Ce type de calibrage permet l'estimation du biais et du gain. Plusieurs calculs sont menés en utilisant les signaux issus des deux capteurs en opposition de phase. Ensuite, la valeur moyenne a été considérée.

Table 2. 2. Calcul du gain et d'offset

b [v]	f
2.46	0.98

La valeur d'accélération est déterminée finalement grâce à l'expression suivante

$$A_{Actuel} = \frac{A_{OUT} - b}{f} \quad 2.33.$$

Il est noté, que les termes de biais et d'offset peuvent varier selon les conditions environnementales, à savoir la température et les vibrations d'où la limite de la solution proposée.

2.7.1.3.4. Détermination de la vitesse

Cette étape précède le calcul de la vitesse. Elle consiste à déterminer l'angle de déviation du capteur selon les expressions 2.6. La reconstruction de la vitesse a été réalisée en se basant sur la procédure détaillée par le diagramme de la figure 2.19. En effet, le moteur tourne à une vitesse fixe estimée à 91 rad/s (valeur mesurée avec un tachymètre de précision 0.05). La reconstruction de la vitesse a été menée à partir des sorties des capteurs. Son évolution est illustrée sur la figure 2.25.

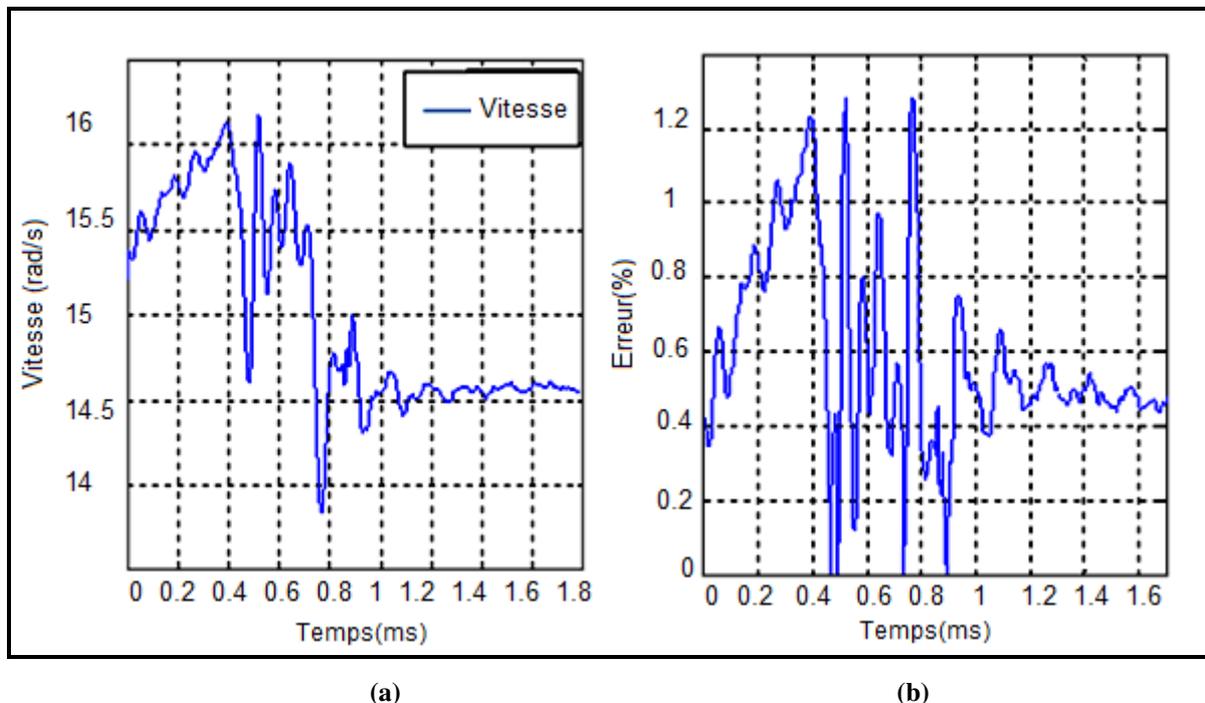


Figure 2. 25 Evolution de la vitesse de rotation déterminée en fonction du temps, b. Evolution de l'erreur relative à la mesure avec les accéléromètres par rapport à celle d'un tachymètre

Les résultats trouvés prouvent la faisabilité de la méthodologie proposée pour la mesure de vitesse dans la pratique. En effet, l'erreur relative dans ce cas est estimée à 1.3% au maximum, comme le montre la figure 2.25.b. Cependant, en augmentant la valeur de la vitesse du moteur, nous constatons que l'erreur sur la vitesse s'élève considérablement puisque les bruits générés par le dispositif expérimental deviennent de plus en plus importants. Les bruits stochastiques présents au niveau des capteurs de technologie MEMS qui sont liés essentiellement

à leur procédure de fabrication, augmentent également du fait du principe de fonctionnement de capteurs capacitifs MEMS basé sur un déplacement d'une masse autour de deux positions, les résultats trouvés peuvent manquer de précision dans le cas de vitesse variable car, dans ce cas, la position d'équilibre de la masse n'est pas répertoriée (vitesse variable). D'où la limite de la méthodologie proposée. Il est donc intéressant d'étudier les différentes perturbations existant au niveau de la mesure et, en particulier, celles liées aux capteurs MEMS afin d'aboutir à de meilleurs résultats expérimentaux

2.7.2. Utilisation de la variance d'Allan pour la détermination de la vitesse

La 1^{ère} méthode de détermination de la vitesse proposée consiste à utiliser un nombre minimal de trois accéléromètres. Ainsi, pour éviter cette redondance matérielle, une approche sera proposée dans la prochaine partie. Elle consiste à utiliser la variance d'Allan des signaux issus des accéléromètres pour la détermination de la vitesse de rotation du moteur. Cette variance est détaillée dans la suite de ce chapitre.

2.7.2.1. Variance d'Allan

La variance d'Allan $\sigma(\tau)$ est une grandeur mathématique qui a été développée en 1966 par son inventeur David Allan pour étudier la stabilité des oscillateurs [ALL 66]. A partir de 1993, elle est devenue un outil très utilisé en métrologie [NG 93]. Actuellement, elle est utilisée pour caractériser et différencier les bruits existant au niveau des capteurs de technologie MEMS [ZHA 08], [SHE 08] et estimer la stabilité de ces derniers. Un de ses principaux avantages est lié à sa capacité de converger quel que soit la nature des bruits. Analytiquement, elle correspond à l'écart-type moyen entre deux séries d'observations successives. En effet, considérons $a(t)$ la sortie instantanée d'un accéléromètre dont la valeur moyenne sur un intervalle de temps commençant par le k^{ème} point est décrite comme suit

$$\overline{a_k(\tau)} = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} a(t).dt \quad 2.34.$$

Le calcul de la variance d'Allan pour l'intervalle de même largeur temporelle τ qui suit et ayant une est décrit selon l'expression 2.35

$$\overline{a_{k+\tau}(\tau)} = \frac{1}{\tau} \int_{t_k+\tau}^{t_k+2\tau} a(t).dt \quad 2.35.$$

La différence entre deux intervalles successifs est illustrée selon l'expression (2.36)

$$d_k(\tau) = \overline{a_{k+\tau}(\tau)} - \overline{a_k(\tau)} \quad 2.36.$$

La variance représente la différence entre deux intervalles adjacents comme le mentionne l'expression (2.37)

$$\sigma_k(\tau)^2 = \langle (d_k(\tau) - \mu_k(\tau))^2 \rangle \quad 2.37.$$

Avec μ_k valeur moyenne de d_k

L'organigramme illustrant les différentes étapes suivies pour l'implantation de la variance d'Allan est illustré au niveau de la figure 2.26.

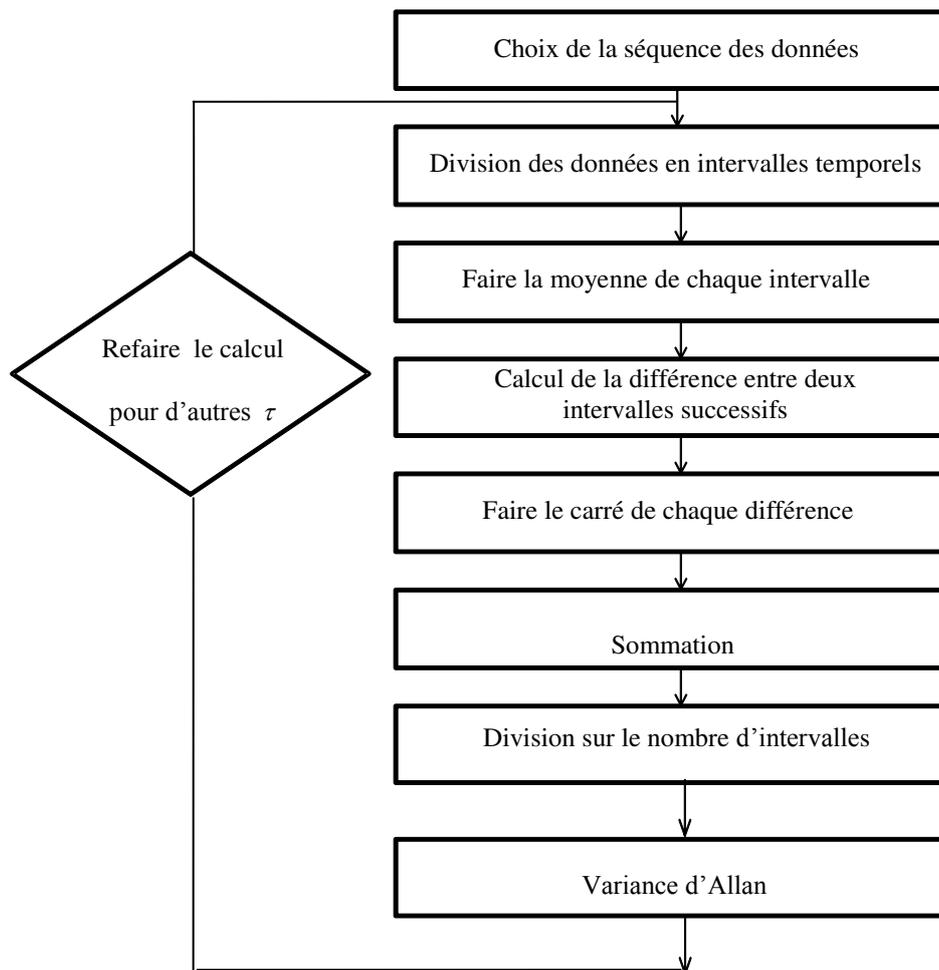


Figure 2. 26 Organigramme de calcul de la variance d'Allan

La première phase consiste à choisir une séquence de données $a(t)$ qui est divisée en intervalles identiques de largeur τ . La détermination de la valeur moyenne est réalisée pour chaque cas. Ensuite, un calcul de la différence entre deux intervalles successifs est effectué. La variance d'Allan correspondant à la valeur τ n'est que la sommation des carrés des différences divisés sur le nombre d'intervalles N . Dans le

cas d'un signal d'accélération discret, la variance d'Allan est décrite selon l'expression (2.38)

$$\sigma(\tau)^2 = \frac{1}{2 \times (N-1)} \sum_{k=1}^{k-1} (a(\tau)_{k+1} - a(\tau)_k)^2 \quad 2.38.$$

2.7.2.2. Corrélation entre la variance d'Allan et la vitesse de rotation

Un suivi d'évolution de la variance d'Allan pour des signaux présentant des valeurs différentes de la vitesse a été effectué. Cette étude a permis de constater l'existence d'une forte corrélation entre la variance d'Allan et la vitesse de rotation du moteur. Les résultats trouvés lors de cette étude sont illustrés au niveau de la figure 2.27 soulignant les zones de variation de la variance d'Allan en fonction du temps τ et paramétrées en vitesse.

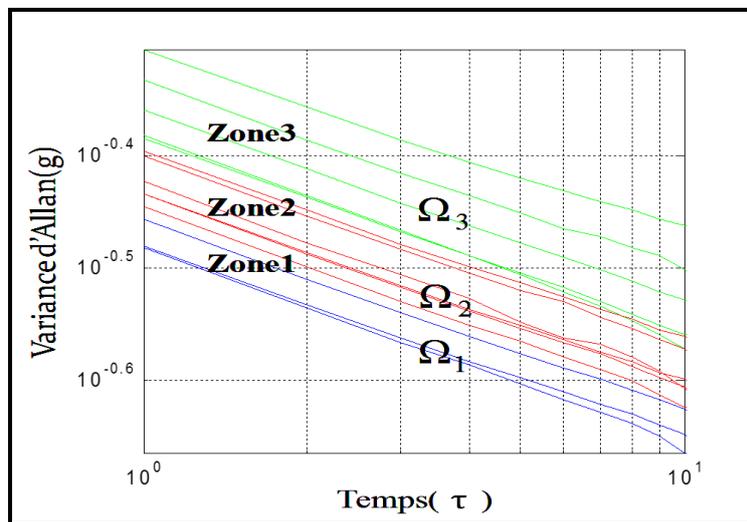


Figure 2. 27 Corrélation entre la variance d'Allan et la vitesse en fonction de τ

L'approche proposée consiste à calculer la variance moyenne correspondant à une valeur fixe de la vitesse. Soit $\sigma_{1moyenne}$, $\sigma_{2moyenne}$ et $\sigma_{3moyenne}$ les variances d'Allan moyennes relatives respectivement à Ω_1 , Ω_2 et Ω_3 avec $\Omega_1 = 10$ rad/s ; $\Omega_2 = 13$ rad/s ; $\Omega_3 = 17$ rad/s .

L'écart entre les variances moyennes déterminées est calculé en fonction de la vitesse. Les variances d'Allan moyennes sont représentées au niveau de la figure 2.28.

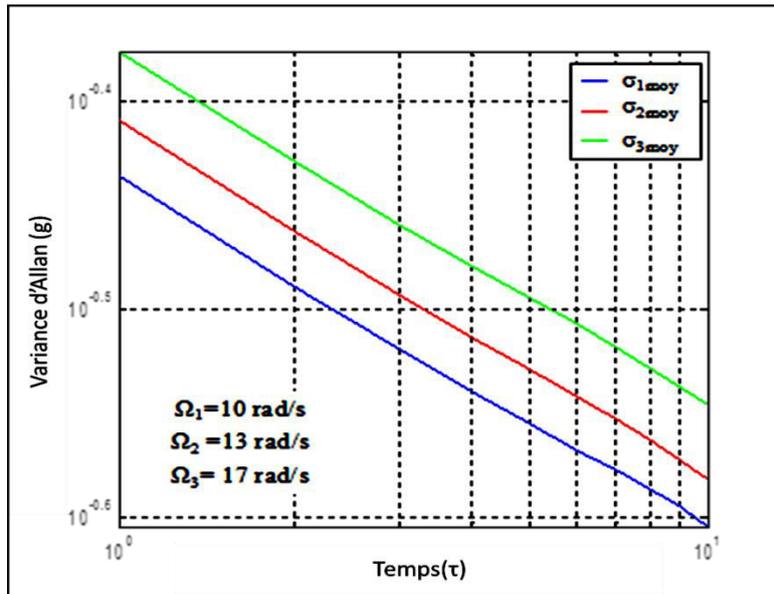


Figure 2. 28 Evolution de la variance d'Allan moyenne pour des valeurs différentes de vitesse

Un calcul de l'écart entre les différentes valeurs moyennes de variance d'Allan a été effectué et la relation entre ce dernier et l'écart de vitesse est illustrée au niveau de tableau 2.3 Dans ce cas d'étude ($\sigma_{2moyenne} - \sigma_{1moyenne}$) est proportionnelle à $\Omega_2 - \Omega_1$ qui est égale à 4 rad/s. De même l'écart entre $\sigma_{2moyenne}$ et $\sigma_{3moyenne}$ correspond à 3 rad/s. De ce fait, un écart de 1 rad/s correspond à une variation de variance d'Allan comprise entre 0.007813 g et 0.007745g.

Table 2. 3 Liaison entre l'écart de la variance d'Allan et la vitesse

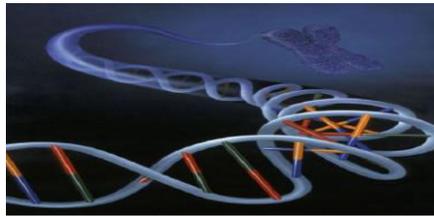
$e_1 = \sigma_{2moyenne} - \sigma_{1moyenne}$	$\Omega_2 - \Omega_1$	Ecart pour 1 rad/s
0.02344	3 rad/s	0.007813
$e_2 = \sigma_{3moyenne} - \sigma_{2moyenne}$	$\Omega_3 - \Omega_2$	Ecart pour 1 rad/s
0.03098	4rad/s	0.007745

2.8. CONCLUSION

Au cours de cette partie, l'accent a été mis sur les accéléromètres en technologie MEMS comme étant une nouvelle solution de détermination de la vitesse de rotation d'un dispositif tournant bénéficiant d'une miniaturisation et d'une faible consommation en puissance. Deux approches de détermination de la vitesse ont été illustrées. La première est basée sur la redondance matérielle des

accéléromètres et la seconde consiste à l'utilisation de la variance d'Allan. Les deux méthodes ont été développées et les résultats trouvés soulignent la fiabilité de ces accéléromètres MEMS pour une détermination de la vitesse d'un actionneur tournant. Comme tout autre type de dispositifs, les capteurs en technologie MEMS souffrent de certaines limites qui sont soulignées au niveau du chapitre suivant et des solutions pour les soulager sont proposées.

CHAPITRE 3 : PROBLÉMATIQUES LIÉES AUX ACCÉLÉROMÈTRES MEMS ET SOLUTIONS ENVISAGÉES



Résumé

Au sein de ce chapitre l'accent sera mis sur les bruits stochastiques et déterministes relatifs aux accéléromètres de technologie MEMS utilisés dans un dispositif tournant. Ces bruits seront étudiés et de nouvelles approches pour les minimiser seront proposées. Les solutions abordées se basent essentiellement sur l'élaboration d'un signal dit de référence à partir de signaux expérimentaux bruités. En effet, ce signal a été reconstruit avec des algorithmes spécifiques et sera utilisé pour le traitement des signaux délivrés par les capteurs. La mise en place des algorithmes et les tests de fiabilité de la méthodologie proposée seront effectués sur des signaux filaires. Des méthodes de reconstruction ont été testées et un choix a été effectué sur celle répondant à la recherche de l'application étudiée et qui permet d'avoir les résultats les plus fiables possibles.

Sommaire

3.1. INTRODUCTION	59
3.2. PROBLEMATIQUE D'UTILISATION DES ACCELEROMETRES EN TECHNOLOGIE MEMS DANS LES MACHINES ELECTRIQUES	60
3.2.1. Evolutions temporelles des signaux délivrés par les accéléromètres	60
3.2.2. Evolution fréquentielle des signaux (analyse FFT)	62
3.2.3. Evolution de la densité de probabilité statistique des signaux	62
3.3. RECONSTRUCTION D'UN SIGNAL DE REFERENCE	64
3.3.1. Reconstitution d'un signal de référence par une simple moyenne des signaux : Première approche.....	65
3.3.2. Reconstitution d'un signal de référence par la méthode de la variance d'Allan utilisant la technique AG : Deuxième approche	66
3.3.2.1. Les Algorithmes Génétiques.....	66
3.3.2.1.1. Principe de fonctionnement.....	67
3.3.2.1.2. La reproduction	68
3.3.2.1.3. Le croisement	68
3.3.2.1.4. La mutation.....	68
3.3.2.1.5. La convergence	69
3.3.2.2. Principe de la méthode proposée.....	69
3.3.2.3. Résultats de reconstruction.....	70

3.3.3.	Méthode de reconstruction du signal d'accélération à base des AG et sous différents critères de performances : troisième approche.....	72
3.3.3.1.	Principe de la méthode	72
3.3.3.2.	Vérification de l'algorithme d'optimisation utilisée	73
3.3.4.	Stratégie de reconstruction basée sur les critères de performances.....	75
3.3.4.1.	Critères de performance des signaux des capteurs	76
3.3.4.2.	Définition de la fonction coût.....	76
3.3.4.3.	Résultats expérimentaux.....	77
3.3.4.3.1.	Signal de référence pour une vitesse $\Omega_1=10$ rad/s	77
3.3.4.3.2.	Reconstruction du signal de référence pour $\Omega_2=13$ rad/s	82
3.3.4.3.3.	Reconstruction du signal de référence pour $\Omega_3=17$ rad/s	83
3.3.4.3.4.	Catalogue des signaux de référence	85
3.4.	CONCLUSION	86

3.1. INTRODUCTION

Les accéléromètres en technologie MEMS ont été introduits précédemment en tant qu'une nouvelle solution de mesure de la vitesse des machines tournantes. Ces accéléromètres présentent plusieurs avantages comme leur faible coût, leur petite taille et leur consommation énergétique réduite. Cependant, il est important de signaler que leur structure assez fine et leur procédure de fabrication faisant appel à de multiples techniques [GIA 92], donnent naissance à des bruits de nature déterministes et stochastiques [JUD 01] [ALB 08] [LYV 02], ce qui les rend plus sensibles aux perturbations par rapport aux capteurs traditionnels [STA 06] et [BOE 10]. Mis à part les bruits naturels cités auparavant, l'environnement de l'utilisation de ces dispositifs affecte aussi leurs sorties notamment lorsqu'ils sont présents dans un milieu riche en perturbations dues aux vibrations et aux champs magnétiques [BOE 10] comme le cas de notre système étudié à savoir la machine électrique tournante. De plus, ces capteurs seront envisagés par la suite pour une application sans fils où d'autres phénomènes liés à la communication s'ajoutent et qui peuvent provoquer une perte de paquet de signal suite aux phénomènes de diffraction, de diffusion et de réfraction engendrés par la rotation. Afin de pallier aux problèmes liés aux bruits stochastiques de ces capteurs, des études ont été menées au niveau de la littérature et diverses méthodes ont été développées. La variance d'Allan (VA) et la densité spectrale sont considérées parmi les approches les plus utilisées pour l'évaluation de l'erreur stochastique relative à ces dispositifs [HOU 03], [VAG 12]. Cette évaluation mènera à une connaissance des bruits et une modélisation plus pertinente du capteur.

D'autres travaux se sont basés sur l'utilisation du filtre de Kalman [DON 12] pour reconstruire le signal filtré. Cependant une telle solution entraîne des temps de calcul assez importants et risque de diverger dans le cas d'une mauvaise identification des bruits. Une nouvelle approche de traitement des signaux issus des accéléromètres en technologie MEMS sera abordée dans ce travail. Cette approche est basée sur la connaissance à priori de l'évolution des signaux d'accélération grâce à un traitement spécifique effectué sur les signaux réels issus des capteurs. Elle a le mérite de ne demander aucune connaissance des valeurs de bruits et elle se base uniquement sur les signaux expérimentaux issus de ces capteurs ce qui est considéré comme étant un avantage par rapport aux autres solutions existantes. Il est bien noté que l'objectif de ce chapitre consiste à tester la

faisabilité et la robustesse des algorithmes proposés pour la mesure de vitesse avec des accéléromètres MEMS et par la suite choisir convenablement l’algorithme qui sera adopté pour l’application sans fils constituant l’objectif principal de ces travaux de recherche. Un suivi des évolutions des signaux issus des capteurs pour différentes positions et états de rotation a été effectué. Également, un signal de référence approprié à chaque état (vitesse rotation) sera défini. Étant précisé que deux types d’algorithmes seront proposés et un choix sera effectué sur celui permettant d’avoir les meilleurs résultats. Ainsi le présent chapitre sera organisé comme suit : la première partie est consacrée à la présentation des différents problèmes liés aux mesures à base des accéléromètres en technologie MEMS utilisées dans un actionneur tournant. Ensuite, la seconde partie portera sur l’étude comparative des méthodes de reconstruction proposées pour la génération du signal de référence et le choix d’un algorithme qui sera retenu pour l’étude sans fils.

3.2. PROBLEMATIQUE D’UTILISATION DES ACCELEROMETRES EN TECHNOLOGIE MEMS DANS LES MACHINES ELECTRIQUES

Dans cette partie l’accent sera mis sur l’effet des perturbations sur l’évolution temporelle et spectrale des signaux issus des accéléromètres MEMS. Il est noté que les acquisitions illustrées ont été effectuées avec le même banc de test expérimental mentionné dans le deuxième chapitre (cf. figure 2.20).

3.2.1. Evolutions temporelles des signaux délivrés par les accéléromètres

Un suivi de l’évolution des signaux issus des trois accéléromètres ADXL203 selon l’axe x est effectué. Ces capteurs sont placés en quadrature comme le montre la figure 3.1. En effet, il s’agit de la même disposition qui a été utilisée précédemment pour la détermination de la vitesse de rotation (cf. chapitre 2).

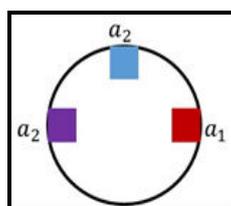


Figure 3. 1 Localisation des capteurs dans les trois quadrants

Les signaux délivrés par les différents accéléromètres utilisés décrivent une évolution quasi sinusoïdale et un décalage au niveau de la phase comme le montre

la figure 3.2. Cela est dû principalement à la sensibilité des capteurs variant avec la rotation du moteur ainsi qu'au changement de la direction de la composante de gravité « g » et aux perturbations liées à l'environnement d'utilisation, à savoir la rotation et les champs magnétiques à l'intérieur du moteur. D'autres bruits sont provoqués par le dispositif mécanique assurant le contact entre la partie tournante et la partie fixe. Tous ces phénomènes affectent la qualité du signal en provoquant des variations aléatoires qui s'ajoutent au signal idéal. Les accélérations délivrées par les capteurs sont illustrés au niveau des figures 3.2. Il est à préciser que les valeurs d'accélération illustrées correspondent à une vitesse estimée à 10 rad/s et la période du signal d'accélération issu du capteur est estimée dans ce cas à 0.628s.

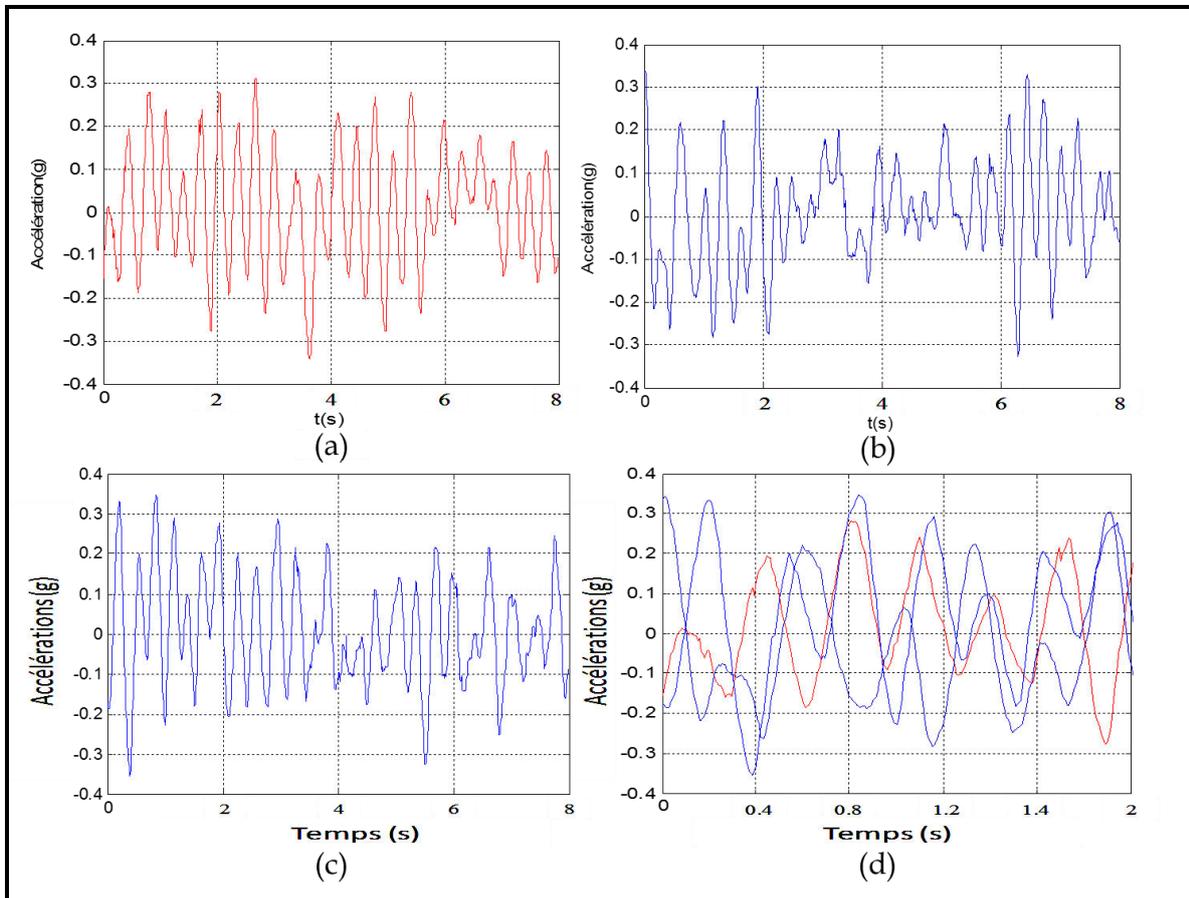


Figure 3. 2 Evolution d'un signal d'accélération en fonction du temps

(a).Capteur 1, (b).Capteur 2, (c).Capteur 3, (d). Les trois capteurs

Ces illustrations, montrent que les trois capteurs décrivent des évolutions différentes au niveau de leurs sorties bien que la machine tourne avec la même vitesse de rotation.

Dans la section suivante, nous aborderons l'évolution fréquentielle de ces signaux.

3.2.2. Evolution fréquentielle des signaux (analyse FFT)

Le signal étudié étant considéré continu et périodique, il est donc décomposable en série de Fourier. Une analyse spectrale a été réalisée afin d'étudier les différents harmoniques existants. Ainsi, l'évolution spectrale des signaux d'accélération présentée sur la figure 3.3 souligne la présence des harmoniques qui révèlent ces critères bruités. Ce critère est lié à plusieurs phénomènes qui sont propres au capteur ou qui sont engendrés par l'effet de la rotation du moteur. Les harmoniques prépondérants dans les trois signaux à savoir ceux ayant les fréquences suivantes (2.3Hz, 2.5Hz, 2.6Hz) sont liés à la fréquence de rotation du moteur et leurs amplitudes varient d'un capteur à un autre selon leur sensibilité. D'autres harmoniques présentant des caractérisations aléatoires qui diffèrent considérablement d'un capteur à un autre et qui sont repérés au niveau de l'analyse spectrale des signaux relatifs aux trois capteurs. Les analyses spectrales relatives aux trois signaux décrivent des représentations semblables autour d'une fréquence voisine de 2.5HZ qui représente la fréquence de rotation du moteur.

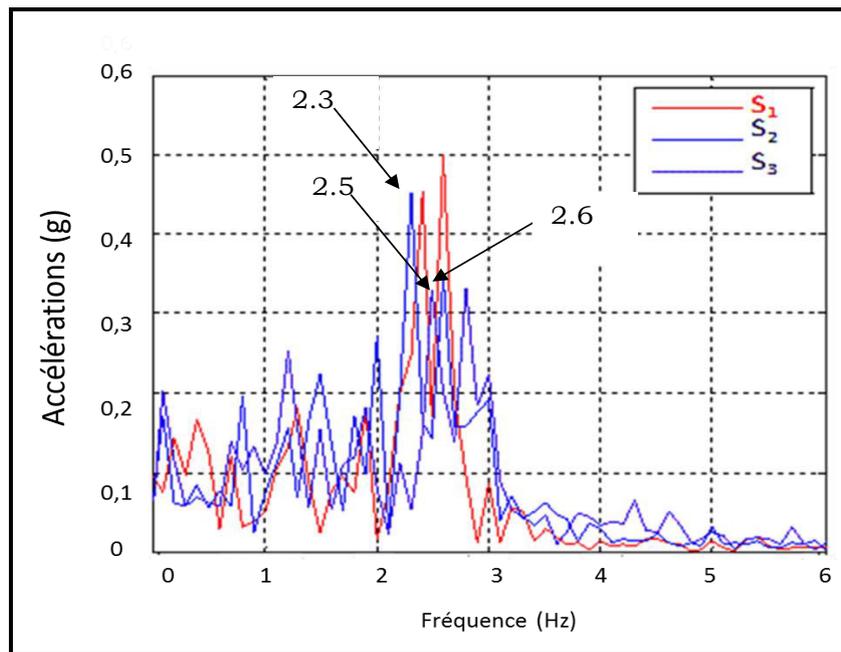


Figure 3. 3 Evolution spectrale des signaux des accéléromètres en fonction de la fréquence

3.2.3. Evolution de la densité de probabilité statistique des signaux

Outre l'évolution temporelle, spectrale et statistique, la fonction de densité de probabilité a été également utilisée. En effet, cette dernière permet d'illustrer l'évolution de la densité de probabilité pour qu'un échantillon $x(N)$ prenne une certaine valeur. Un signal de n échantillons a été pris comme exemple et le calcul

de la fonction consiste à compter les portions d'échantillons dont les valeurs sont comprises entre x et $x+dx$. L'estimation de la densité de probabilité est illustrée par la figure 3.4 et son calcul est déterminé selon l'expression 3.1

$$p(x).dx = \sum_1^N \frac{n(x, x+dx)}{N} \quad 3.1.$$

Avec N représente le nombre de fourchettes utilisées pour la détermination de cette fonction (dans ce cas ce nombre est égal à 100).

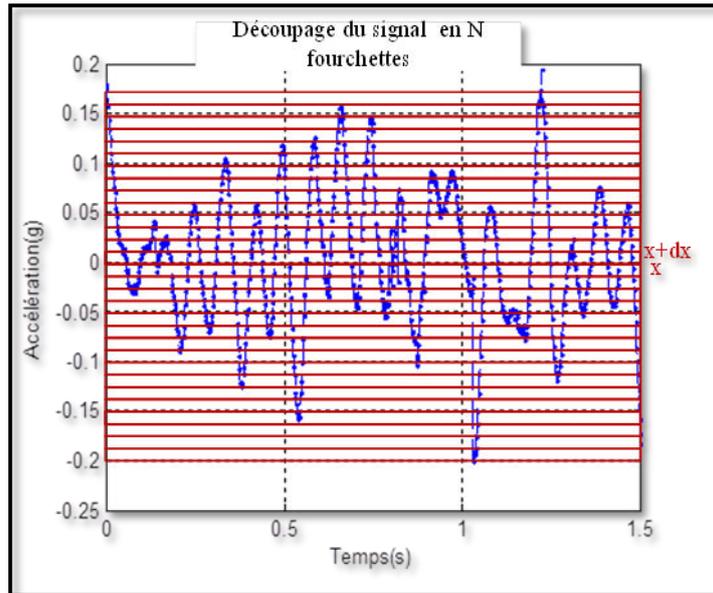


Figure 3.4 Détermination de la fonction de probabilité de signal

Les résultats obtenus qui sont relatifs aux trois signaux de capteurs sont représentés au niveau des figures 3.5. Il est à signaler que le *Cdf* (Cumulative Distribution Function) représente la fonction de répartition cumulative et N est le nombre de fourchettes utilisées pour la détermination de cette fonction (dans ce cas $N = 100$).

La densité de probabilité (cf. figure 3.5.a) et la fonction de répartition *Cdf* illustrée sur la figure 3.5.b permettent de suivre l'évolution statistique des signaux. Il est clair selon les figures 3.5.a et 3.5.b que les signaux possèdent des représentations statistiques différentes.

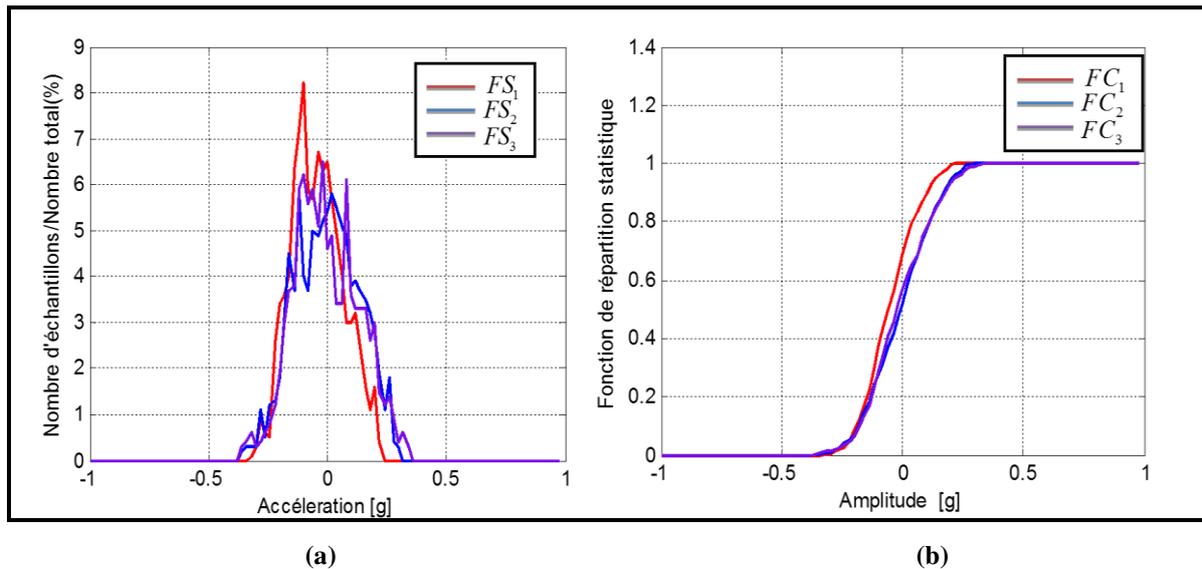


Figure 3. 5 a. Fonction de Densité de Probabilité(FS), b. Fonction de Distribution Cumulative (FC) des signaux issus des accéléromètres

Pour résumer, les analyses temporelle, spectrale et statistique effectuées ont révélé des évolutions différentes des signaux dues principalement à la présence des perturbations stochastiques au niveau des signaux issus des capteurs. Les dites perturbations doivent être minimisées pour améliorer les résultats. Par ailleurs, cette étude consiste à souligner les critères pondérant des signaux des accéléromètres relatifs à une même valeur de vitesse de rotation du moteur et qui seront utiles par la suite pour définir le signal de référence. Dans cette optique, plusieurs approches sont envisageables pour la génération du signal de référence. Cette tâche fera l'objet de la section suivante.

3.3. RECONSTRUCTION D'UN SIGNAL DE RÉFÉRENCE

L'idée de cette partie consiste à la recherche d'une description du signal d'accélération dit de référence permettant de reproduire d'une manière fidèle, autant que possible, le signal réel délivré par l'accéléromètre et qui servira comme nous l'avons signalé pour le calibrage des signaux et pour minimiser les erreurs stochastiques. Le filtrage du signal d'accélération entraîne une perte importante d'informations en produisant une altération de la vitesse correspondante, ce qui justifie la reconstruction du signal de référence. En effet, à partir des acquisitions expérimentales réalisées, la recherche d'un signal représentatif attribué pour chaque cas de vitesse sera menée. Des méthodes de reconstruction seront proposées dans la suite en vue de choisir la méthode permettant d'offrir les meilleurs résultats. La méthode choisie sera adoptée pour définir un catalogue des signaux de référence et sera utilisée par la suite dans le cas sans fils.

3.3.1. Reconstitution d'un signal de référence par une simple moyenne des signaux : Première approche

La première méthode de reconstruction proposée consiste à faire la moyenne de trois signaux issus des trois capteurs identiques et qui sont bien répartis sur le disque solide de l'axe du moteur comme le montre la figure 3.6. Cette redondance matérielle a été mise en place pour avoir une meilleure connaissance du signal et donc une estimation plus précise de son évolution. Ainsi, pour chaque instant t un seul capteur permet de délivrer la valeur d'accélération la plus proche de la réalité. Cette hypothèse est soulignée étant donnée la forte liaison de corrélation entre la sensibilité de ces dispositifs et leur position par rapport à la gravité. De ce fait, dans ce cas le signal S_{moy} de référence sera calculé comme étant la moyenne des trois signaux (S_1, S_2, S_3) relatifs aux accéléromètres (1, 2, 3). Ce signal est décrit selon l'expression 3.2

$$S_{moy} = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3} \quad 3.2.$$

Les acquisitions des trois capteurs sont prises au même instant t et pendant un certain intervalle temporel Δt . L'évolution de ces signaux ainsi que celle du signal reconstruit sont illustrés dans la figure 3.6.

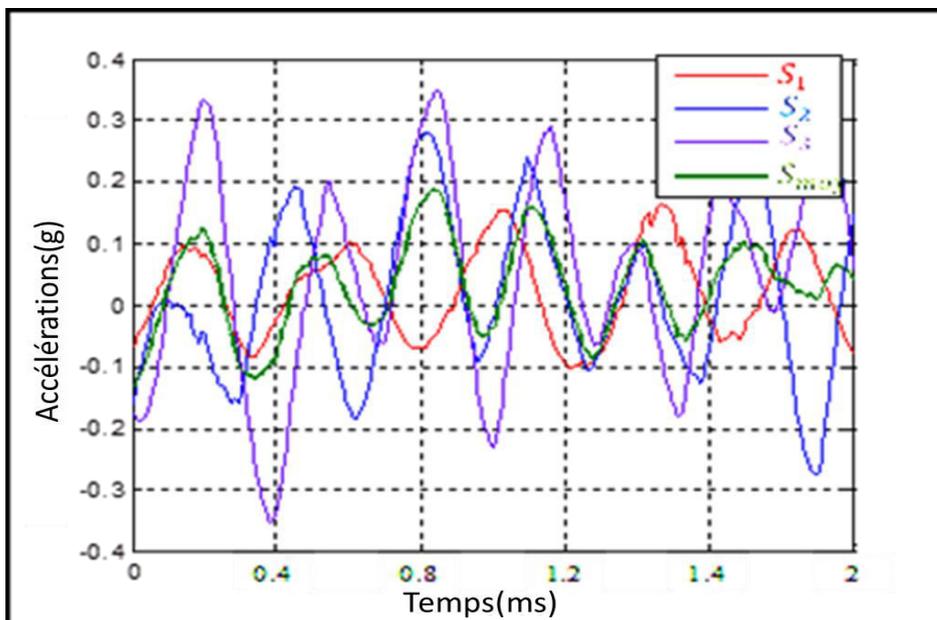


Figure 3. 6 Evolution des signaux des capteurs et du signal reconstruit

La méthode de redondance matérielle proposée présente une solution qui augmente la connaissance apportée sur le signal étant donné qu'elle est basée sur les trois signaux issus des capteurs à différentes dispositions par rapport à l'axe en rotation. Cependant, elle ne permet pas de résoudre les problèmes liés aux bruits

stochastiques. Une analyse spectrale a été menée (cf. figure 3.7) afin de comparer le spectre relatif au signal reconstruit par rapport aux autres. Une minimisation d'amplitude de certains spectres relatifs aux bruits est ainsi observée dans la figure 3.7. Cela dit que la moyenne des signaux ne permet pas d'éliminer les bruits étant donné que le signal reconstruit garde les mêmes caractéristiques (harmoniques) que les autres.

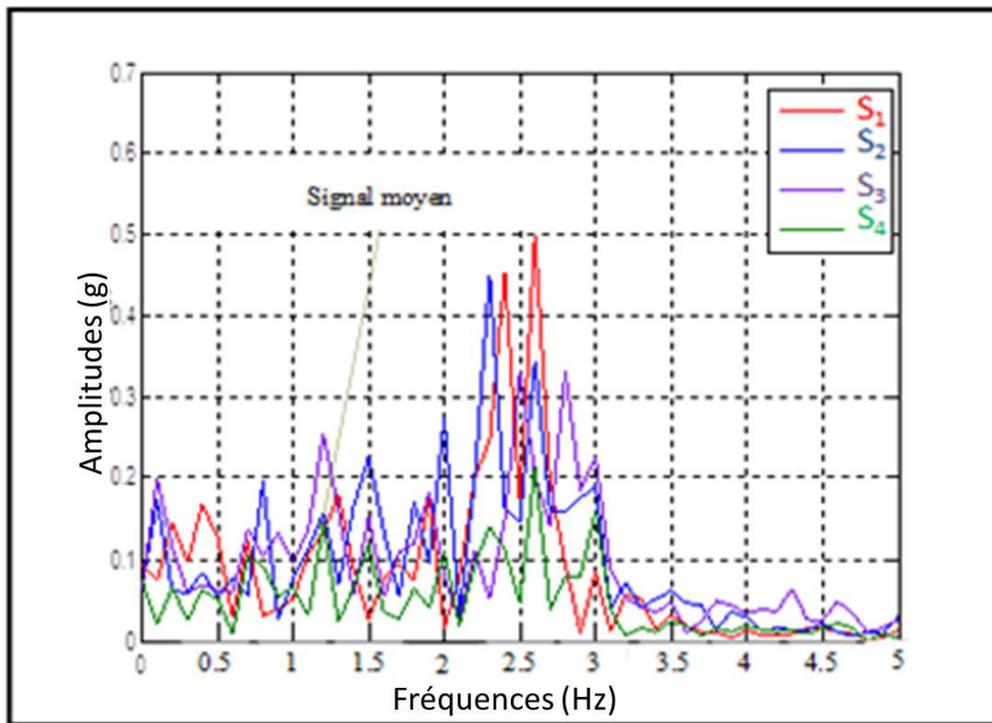


Figure 3.7 Analyse spectrale des signaux des accéléromètres et du signal moyen

3.3.2. Reconstitution d'un signal de référence par la méthode de la variance d'Allan utilisant la technique AG : Deuxième approche

Avant d'aborder les détails trouvés pour cette méthode un bref descriptif des AG et de leurs principes de fonctionnement a été mené.

3.3.2.1. Les Algorithmes Génétiques

Les Algorithmes Génétiques (A.G) sont des techniques de recherche globales émulant le mécanisme naturel de la génétique. L'idée principale d'un A.G consiste à reproduire l'évolution naturelle d'organismes (individus), en respectant la loi de l'évolution des espèces énoncée par Darwin. Selon ces principes dans une population d'individus, ce sont les plus forts qui survivront et pourront donner une descendance. Les A.G. sont caractérisés par leur robustesse de recherche dans un

espace complexe et ils diffèrent des autres méthodes selon plusieurs points en particulier ceux qui ont guidés notre choix :

- Ils travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique,
- Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée et pas sa dérivée
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes, et non déterministes.

3.3.2.1.1. Principe de fonctionnement

Les A.G sont naturellement formulés en termes de maximum par analogie avec la théorie de l'évolution. Il s'agit de la maximisation d'une fonction appelée fonction coût. L'algorithme travaille en parallèle sur une population de candidats, appelés individus (ou chromosomes). Ainsi, un chromosome représente une chaîne d'allèles qui contient des caractéristiques et code les paramètres de sa fonction d'adaptation. Les chromosomes sont distribués dans l'espace de recherche et leur performance est donnée selon la fonction d'adaptation. Chaque individu est constitué d'un ensemble d'éléments appelés caractéristiques (gènes), qui peuvent prendre des allèles. Lors de l'utilisation des A.G, le but est de chercher la combinaison optimale des gènes, qui donne lieu à la nouvelle adaptation. A chaque itération appelée *génération*, est créée une nouvelle population ayant le même nombre d'individus et qui sont mieux adaptés. La structure de l'algorithme génétique standard est représentée sur l'organigramme fonctionnel de la figure 3.8. Les opérateurs de base de l'A.G sont la reproduction, le croisement et la mutation.

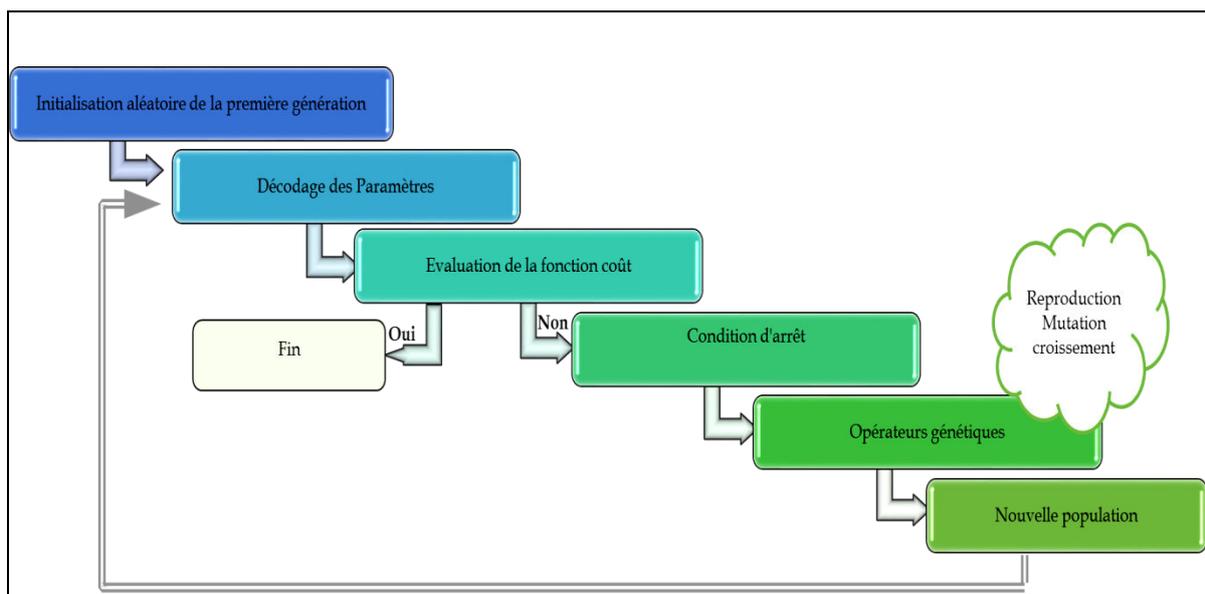


Figure 3. 8 Structure de l'algorithme génétique

3.3.2.1.2. La reproduction

C'est un mécanisme qui fixe à partir de la génération précédente, quels individus pourront se reproduire pour créer la génération suivante. Dans la littérature des A.G., il existe plusieurs modes de reproduction et le mode le plus connu est la sélection proportionnelle qui consiste à dupliquer chaque individu proportionnellement à son adaptation dans son milieu.

3.3.2.1.3. Le croisement

Le croisement de deux individus appelés parents donne deux autres individus appelés enfants permettant ainsi d'augmenter la population en échangeant les gènes de chaque parent entre le site sélectionné et la position finale des deux chaînes comme l'illustre la figure 3.9.

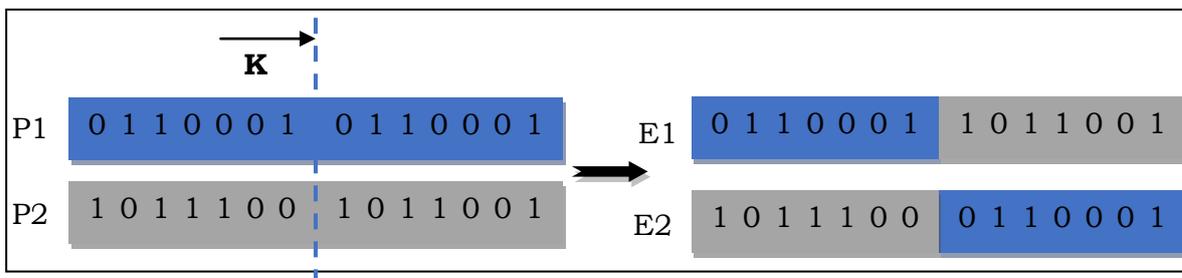


Figure 3. 9 Croisement à 1 site

3.3.2.1.4. La mutation

La mutation introduit une petite altération aléatoire d'un gène d'un individu. Ainsi, on assure que l'on a balayé l'ensemble de l'espace et que l'on ne s'est pas bloqué sur une solution locale. Dans la phase de mutation, on remplace un gène par un autre, appartenant au même alphabet avec une probabilité de mutation notée P_m et de valeur faible. Cette procédure est décrite selon la figure 3.10.

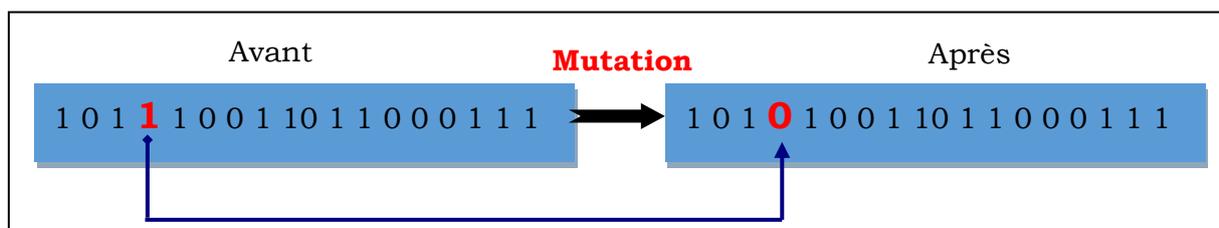


Figure 3. 10 Mutation simple

3.3.2.1.5. La convergence

C'est une notion importante car c'est la notion de convergence qui va permettre à un A.G d'arrêter ses investigations pour rechercher la solution. On parle plutôt d'un critère d'arrêt. Deux techniques sont utilisées dans la pratique pour arrêter l'A.G. La première repose sur l'a priori que la population a convergé au bout de n générations. On estime alors que l'algorithme a convergé et que l'individu de plus forte performance dans la population considérée correspond à la solution cherchée. La deuxième méthode consiste en des mesures du degré d'uniformité des individus présents dans la population. En effet, un gène (bit) est dit avoir atteint la convergence quand 95 % de la population possède la même valeur pour ce gène ou encore lorsque l'adaptation d'une partie ou de l'ensemble de la population se rapproche de celle du meilleur individu. Cette dernière condition se reproduit lorsque:

$$1 - \frac{f_{\text{moy}}}{f_{\text{max}}} \leq \varepsilon \quad 3.3.$$

f_{moy} et f_{max} étant l'adaptation moyenne et maximale de la population et ε est la précision requise sur la convergence.

3.3.2.2. Principe de la méthode proposée

Cette méthode consiste à chercher le signal de référence qui sera défini comme étant la somme pondérée des accélérations issues de trois capteurs géométriquement placés (cf. figure 3.5) et soumis aux mêmes conditions expérimentales (même vitesse de rotation).

Les coefficients de pondération (w_1 , w_2 et w_3) attribués respectivement aux signaux (S_1 , S_2 et S_3) seront calculés avec une technique de l'intelligence artificielle qui est l'Algorithme Génétique(AG). Il est important de signaler que le choix des critères d'optimisation est une étape fondamentale pour la reconstruction du signal de référence. En effet, la fiabilité de cette variance pour la détermination de la vitesse a été soulignée au niveau du chapitre précédent où une liaison de corrélation entre cette variance et la valeur de vitesse a été élaborée d'où vient notre choix pour cette variance comme étant un critère d'optimisation.

La méthodologie de reconstruction consiste à calculer la variance d'Allan de chacun des trois signaux issus des accéléromètres. Ensuite, la valeur moyenne des

variances d'Allan est calculée. Le signal reconstruit dans ce cas représente celui ayant la variance d'Allan la plus proche de sa variance moyenne.

Les détails de la méthode de reconstruction et les résultats trouvés seront exploités dans la suite. La figure 3.11 représente une schématique de la méthodologie suivie pour la reconstruction où (w_1 , w_2 et w_3) représentent respectivement les coefficients de pondération relatifs aux signaux (S_1 , S_2 et S_3).

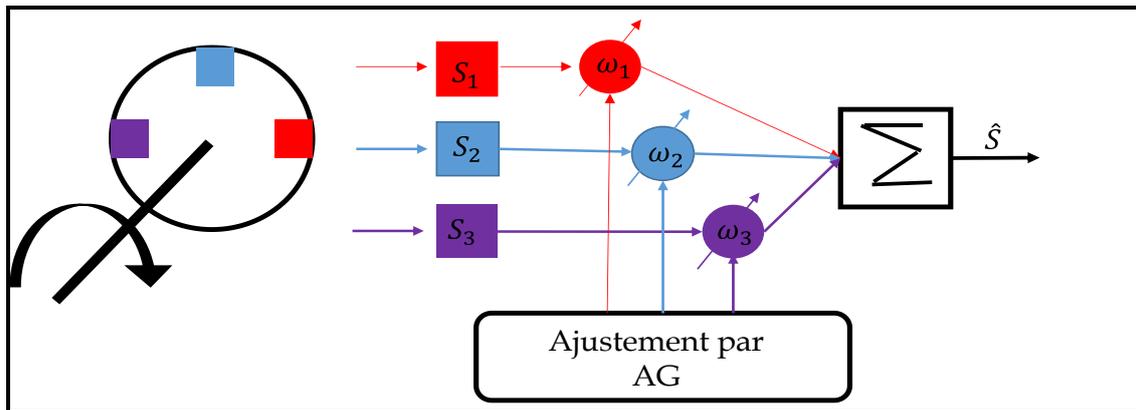


Figure 3. 11 Méthodologie de reconstitution du signal de référence

Comme le montre la figure 3.11, le signal de référence reconstruit pour une certaine valeur de vitesse de rotation Ω du moteur correspond à l'individu ayant la valeur de variance d'Allan la plus proche de la moyenne (c'est à dire la valeur calculée à partir des variances des différents signaux des capteurs pris pour la même vitesse). En effet, cette variance sert à caractériser la stabilité des dispositifs. La fonction coût est donc décrite selon l'expression suivante :

$$f_c = \sum_{i=1}^N \tilde{S}^2 \quad 3.4.$$

Avec

$$\tilde{S} = S - \hat{S} \quad 3.5.$$

$$\hat{S} = w_1 \times S_1 + w_2 \times S_2 + w_3 \times S_3 \quad 3.6.$$

Avec w_1 , w_2 et w_3 représentent les coefficients de pondérations relatifs à S_1 , S_2 et S_3 .

3.3.2.3. Résultats de reconstruction

Pour analyser la convergence de l'algorithme une représentation de l'évolution de la variance d'Allan moyenne et celle relative au signal reconstruit est illustrée au niveau de la figure 3. 12.a. Une corrélation entre les deux variances a

été bien notée. De plus pour évaluer cet écart un calcul d'erreur entre ces deux variances a été fait (cf figure 3.12.b). L'erreur relative ne dépasse pas 0.3% ce qui souligne la convergence de l'algorithme d'optimisation vers la meilleure population. Il est également noté que pour la variance d'Allan a été déterminée pour $\tau=0.16s$.

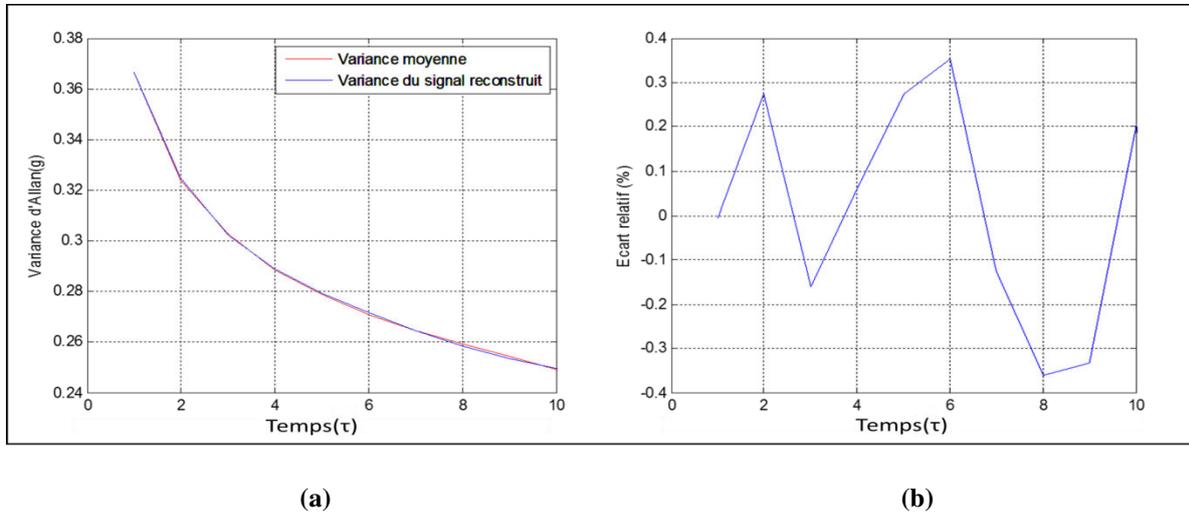


Figure 3. 12.a. Evolution de la variance d'Allan moyenne et celle du signal reconstruit, b. Evolution de l'erreur relative sur la variance d'Allan

D'autre part, la représentation des différents signaux ainsi que celle du signal reconstruit sont données au niveau de la figure 3.13. a. De ces observations, le signal reconstruit, illustré dans la figure (3.13.b), correspond à la bonne combinaison des poids des trois signaux des capteurs (S_1 , S_2 , S_3) retrouvée par AG.

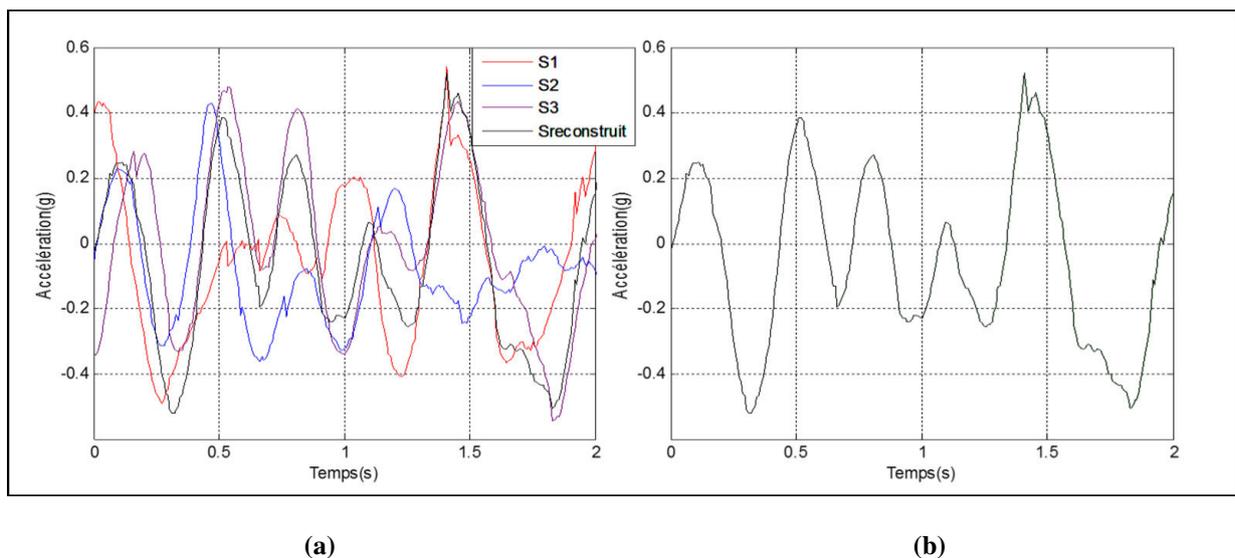


Figure 3. 13.a. Evolution des signaux des capteurs par rapport à ceux du signal reconstruit, b. Evolution du signal reconstruit

Les poids calculés et attribués à chaque signal sont illustrés dans le tableau 3.1.

Table 3. 1. Poids relatifs pour chaque signal

Signal	S ₁	S ₂	S ₃
Poids attribué	0.5835	0.2582	0.7194

Pour résumer, les deux algorithmes de reconstruction du signal de référence proposés jusqu'à présent requièrent une utilisation de trois capteurs pour définir le signal dit de référence. Ceci peut être très encombrant en termes de structure et fiabilité étant donné que nous envisageons une structure optimale avec la moindre consommation en temps de calcul. Dans cet objectif, une nouvelle méthode de reconstruction sera proposée dans la suite où uniquement un seul capteur sera utilisé. Mise à part la variance d'Allan, d'autres critères d'optimisation seront utilisés, à savoir les critères statistiques (fonction de distribution statistique) et ceux temporels (maximal, minimal).

3.3.3. Méthode de reconstruction du signal d'accélération à base des algorithmes génétiques: troisième approche

3.3.3.1. Principe de la méthode

Cette approche de reconstruction est basée sur le développement en série de Fourier du signal. Elle consiste principalement à rétablir les signaux d'accélération issus des capteurs à partir de la somme des M motifs élémentaires de forme sinusoïdale et elle est décrite selon l'expression (3.7).

$$S = \sum_{n=0}^M A_n \sin(2 \times \pi \times f_n \times t + \varphi_n) \quad 3.7.$$

Avec $0 \leq A_n \leq S_{\max}$ et $f_n = \frac{1}{\tau_s}$

Les signaux élémentaires sont caractérisés par une certaine amplitude A_n , une fréquence f_n et une phase φ_n comme le montre la figure 3. 14.

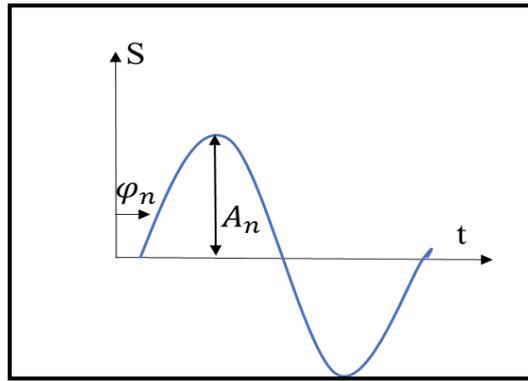


Figure 3. 14 Motifs élémentaires du signal

L'algorithme d'optimisation à base des AG sert à déterminer les différentes caractéristiques des motifs constituant le signal de telle sorte que le signal reconstruit doit répondre à un nombre de contraintes définies à partir des acquisitions expérimentales. Une approche similaire a été développée par l'auteur [JAA 13] qui a utilisé différents types de motifs élémentaires (segment, sinus et sinus cardinal) pour générer un profil de référence dédié à un système de traction. Dans notre cas, nous nous intéressons à reconstruire un signal de référence pour un capteur MEMS utilisé dans une machine électrique en rotation. L'approche de reconstruction proposée permet de résoudre un problème d'identification des différentes caractéristiques des motifs élémentaires pour satisfaire un nombre de contraintes qui seront définies par la suite à partir des signaux expérimentaux issus d'un seul capteur. La méthode proposée permettra donc d'avoir un signal de référence le moins perturbé que possible par rapport à celui directement récupéré des capteurs.

Un test de validité de la méthode sera proposé dans la suite. Il consiste à régénérer un signal d'accélération bien défini à partir des motifs élémentaires sinusoïdaux en utilisant l'algorithme génétique pour la détermination des paramètres relatifs au signal à savoir $[A_n, f_n, \varphi_n]$ qui seront détaillés dans la suite.

3.3.3.2. Vérification de l'algorithme d'optimisation utilisée

L'algorithme proposé permet de minimiser l'écart ε entre le signal d'accélération généré noté S_{gen} et celui de référence nommé S_{ref} . L'AG est utilisé dans ce cas pour identifier les différents paramètres $[A_n, f_n, \varphi_n]$ relatifs à chaque motif (cf. figure 3.14), ce qui permet par la suite de reproduire la même allure du signal

d'accélération. Le principe de la méthodologie proposée est reporté au niveau de la figure 3.15.

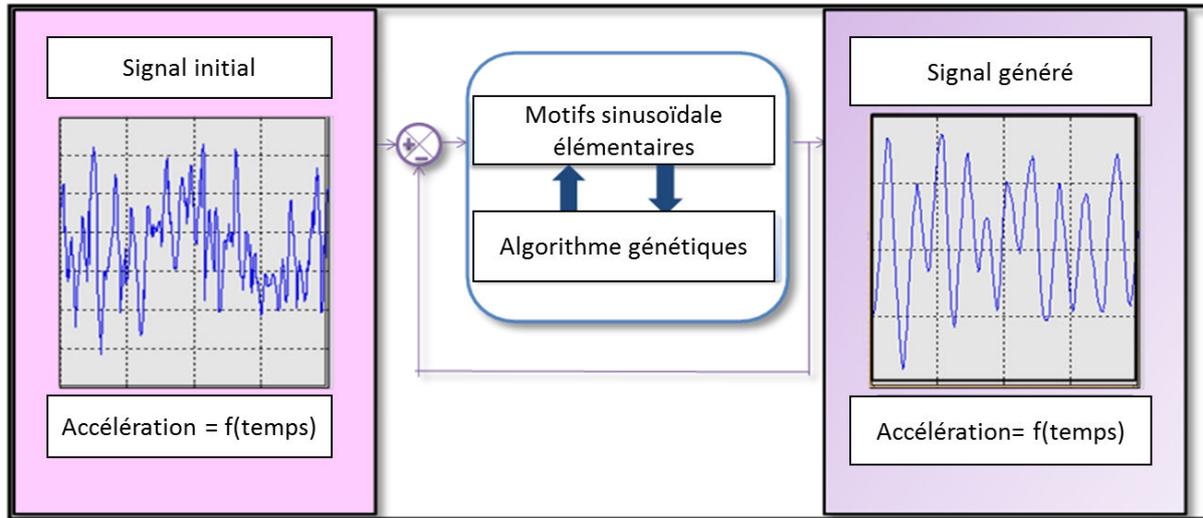


Figure 3. 15 Localisation du capteur dans les trois quadrants

Principe de la méthodologie de reconstruction

La fonction coût utilisée dans ce cas est définie selon l'équation (3.8).

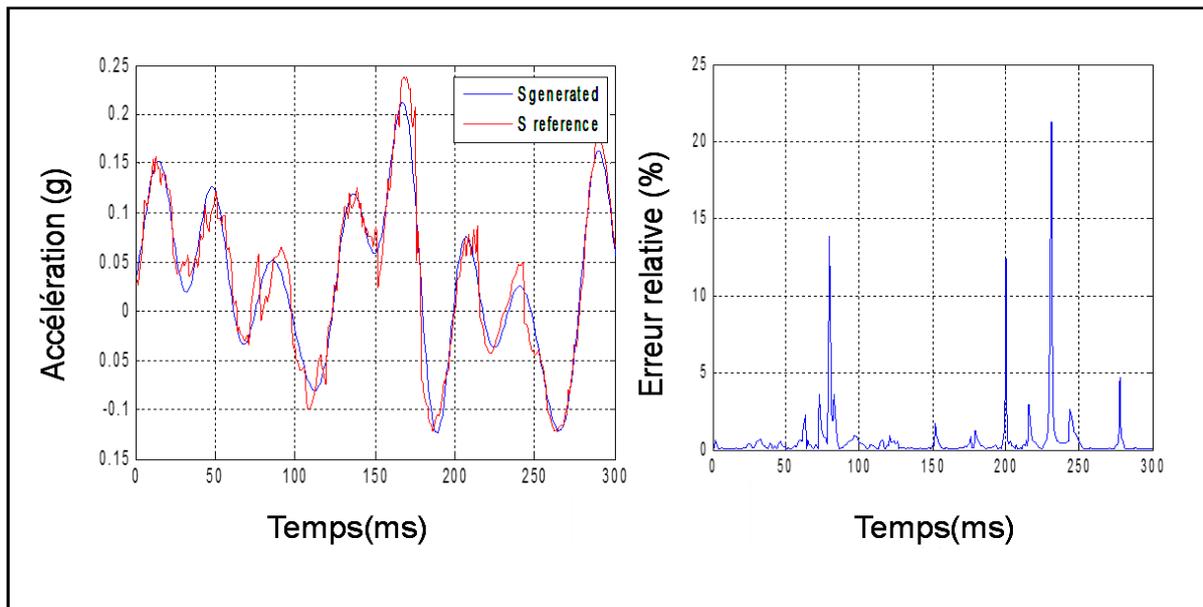
$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (S_{ref}(i) - S_{gen}(i))^2} \quad 3.8.$$

Dans laquelle N représente le nombre d'échantillons

Il est noté qu'à partir d'un nombre de 10 motifs élémentaires, le signal généré et celui de référence deviennent corrélés. Ceci, permet de souligner la capacité de l'algorithme proposé à reconstruire le signal d'accélération issu du capteur indépendamment de son degré de complexité et des perturbations qui le constituent.

Une représentation de l'évolution des signaux issus du capteur et celle de référence est illustrée par la figure 3.16.a). En outre, la figure 3.16.b montre clairement que l'erreur relative correspondant à l'écart entre l'accélération initiale et celle reconstruite est minimale.

Ces observations permettent de mettre en exergue la capacité de l'approche proposée à converger vers le signal d'accélération réel et à reproduire convenablement et d'une façon fiable, le signal issu des accéléromètres.



(a)

(b)

Figure 3. 16.a. Evolution du signal généré et celui de référence, b. Evolution de l'erreur relative

Dans ce qui suit, nous aborderons plus en détail la stratégie de reconstruction adoptée.

3.3.4. Stratégie de reconstruction basée sur les critères de performances

Dans cette partie, la fonction à optimiser utilisée pour l'AG sera modifiée avec l'ajout des erreurs relatives aux critères de performance. L'organigramme décrivant la méthode proposée est illustré par la figure 3. 17

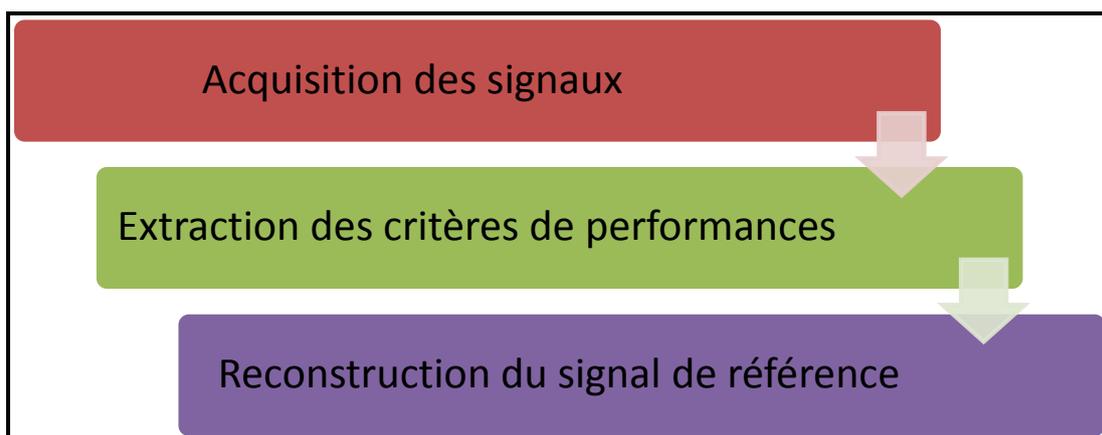


Figure 3. 17 Organigramme de la méthodologie

Dans ce qui suit, nous allons détailler les différentes étapes de la méthode adoptée.

3.3.4.1. Critères de performance des signaux des capteurs

Mise à part la variance d'Allan déjà utilisée, un appel à d'autres critères de performance sera effectué. Ces critères ont été déterminés à partir des signaux expérimentaux. Ainsi pour les mêmes conditions environnementales (même valeurs de vitesse de rotation du moteur) des acquisitions ont été effectuées. L'AG sera utilisé par la suite pour identifier les paramètres relatifs à l'équation (3.7) à savoir $[A_n, f_n, \varphi_n]$. Selon la valeur estimée de f_n et pour chaque période T_n les valeurs maximales S_{n_max} , minimales S_{n_min} et celle de la variance σ_n du signal relatif à chaque motif élémentaire seront déterminées. Ce calcul a été mené pour un certain nombre d'acquisitions. Ensuite, la valeur moyenne relative à chaque critère des différents profils est déterminée en se basant sur les équations (3.9), (3.10) et (3.11).

$$S_{\max} = \frac{1}{M} \sum S_{i\max} \quad 3.9.$$

$$S_{\min} = \frac{1}{M} \sum S_{i\min} \quad 3.10.$$

$$\sigma_{\text{variance}} = \frac{1}{M} \sum \sigma_{i\text{variance}} \quad 3.11.$$

Avec M représente le nombre de signaux pris pour le calcul des valeurs (Max, Min et Variance). Pour ce cas d'étude, un nombre de 17 échantillons a été considéré. Les résultats relatifs aux critères de maximums, minimums et variances déterminés pour plusieurs valeurs de vitesse sont illustrés au niveau du tableau 3.2. Ces résultats montrent que les valeurs maximale et minimale évoluent d'une manière relativement proportionnelle à la vitesse de la rotation du moteur

Table 3. 2 Evolution des critères en fonction de la vitesse

Vitesse (rad/s)	10	13	17
Maximum	0.35	0.4	0.44
Minimum	-0.35	-0.4	-0.44
Variance	0.0504	0.0602	0.0659

3.3.4.2. Définition de la fonction coût

Après le calcul des critères de performances (valeur min, max et celle de variance), l'algorithme d'optimisation est implémenté pour identifier les différents paramètres $[A_n, f_n, \varphi_n]$ minimisant l'erreur globale (l'erreur quadratique relative à la variance, la fonction de distribution et la variance entre les indicateurs de référence

et celle du signal reconstruit). Cette erreur est décrite selon l'expression suivante (3.12).

$$\varepsilon = \left(\frac{S_{\max} - S_{\max ref}}{S_{\max ref}} \right)^2 + \left(\frac{S_{\min} - S_{\min ref}}{S_{\min ref}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma - \sigma_{ref}}{\sigma_{ref}} \right)^2 + \varepsilon_{stat} \quad 3.12.$$

Sachant que ε_{stat} est calculée comme suit :

$$\varepsilon_{stat} = \frac{1}{\sqrt{100}} \times \sum_{i=1}^{100} \left(\frac{Cdf(i) - Cdf_{ref}(i)}{Cdf(i)} \right)^2 \quad 3.13.$$

La méthodologie de reconstruction proposée est décrite par la figure 3.18. Cette figure illustre le fonctionnement de l'algorithme d'optimisation utilisé qui sert à identifier les paramètres relatifs aux motifs sinusoïdaux élémentaires servant à la reconstruction d'un signal de référence.

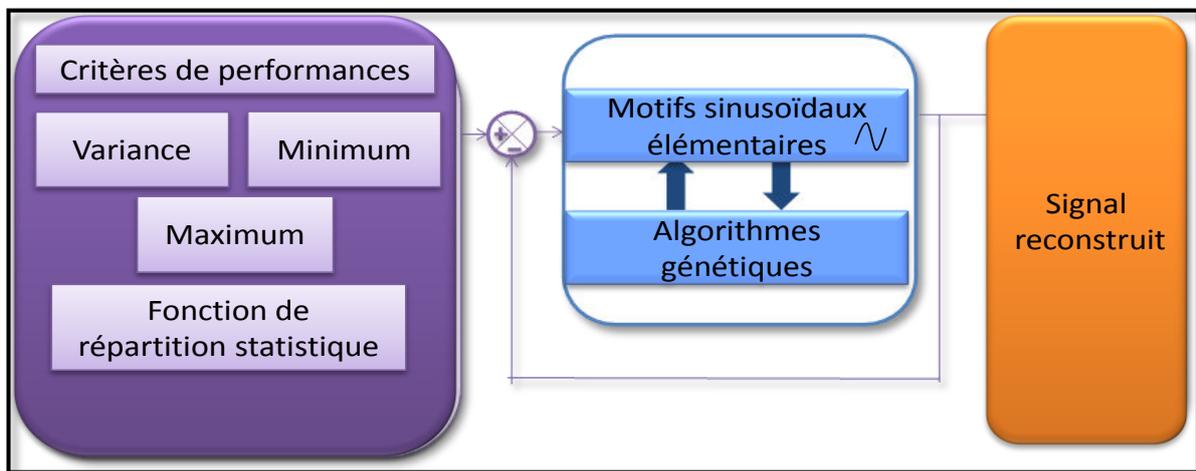


Figure 3. 18 Méthodologie de reconstruction basée sur les critères de performance

3.3.4.3. Résultats expérimentaux

Lors des simulations, nous avons appliqué la méthodologie de reconstruction pour différentes valeurs de vitesse de rotation du moteur, à savoir : $\Omega_1 = 10 \text{ rad/s}$, $\Omega_2 = 13 \text{ rad/s}$ et $\Omega_3 = 17 \text{ rad/s}$. Nous allons montrer dans la suite les résultats de la reconstruction du signal pour chacun des trois cas.

3.3.4.3.1. Signal de référence pour une vitesse $\Omega_1 = 10 \text{ rad/s}$

Pour souligner la bonne convergence de l'algorithme utilisé, un suivi de l'évolution des critères d'optimisation est réalisé à savoir la fonction de répartition statistique, les valeurs minimale, maximale et celle de la variance. L'évolution de la fonction de répartition statistique relative au signal reconstruit et celle du signal

moyen sont illustrées sur la figure 3.19. Il est clair selon cette figure que les deux signaux (reconstruit et sa moyenne) sont assez proches, l'erreur entre les deux est minimale et elle ne dépasse pas 7% (figure 3.19.b). Les résultats relatifs aux critères de convergences choisis à savoir les valeurs maximales, minimales et ceux de la variance sont regroupés au niveau de Tableau 3.3. En effet, il est clair selon ce tableau que les erreurs sur les valeurs maximale et minimale ne dépassent pas 4% et celle relative à la variance est estimée à 2.1%.

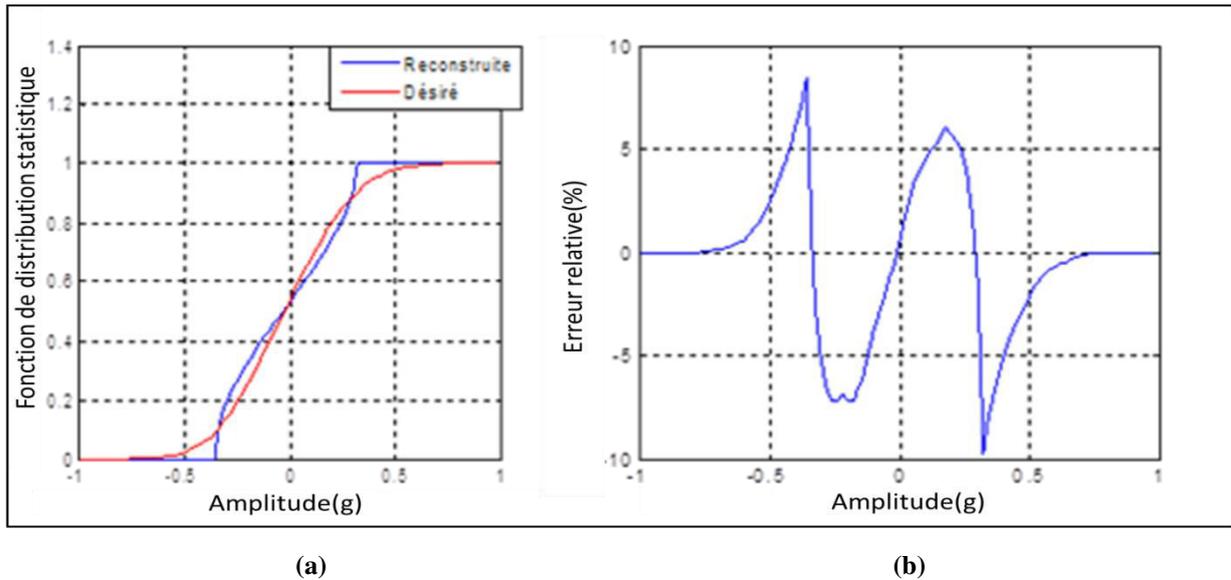


Figure 3. 19. a. Evolution de la fonction de distributions statistique des signaux réel et reconstruit, b. Erreur relative de la fonction de distribution statistique

Table 3. 3 Résultats d'optimisation relatifs aux critères d'optimisation

	Variance	Maximal	Minimal
Signal désiré	0.0504	0.35	-0.35
Signal reconstruit	0.0515	0.336	-0.336
Erreur (%)	2.1%	4%	4%

Les résultats d'identification relatifs à ce cas d'étude sont regroupés dans le tableau 3.4. Ces derniers présentent les paramètres du motif élémentaire reproduisant le signal d'accélération comme l'amplitude, la phase et la fréquence.

Table 3. 4 Les paramètres relatifs à un signal reconstruit à partir d'une seule sinusoïde

A_1 (g)	φ_1 (rad)	f_1 (Hz)
0.3360	2.6821	1.58

Le signal reconstruit ainsi que celui réel sont représentés sur la figure 3.20.

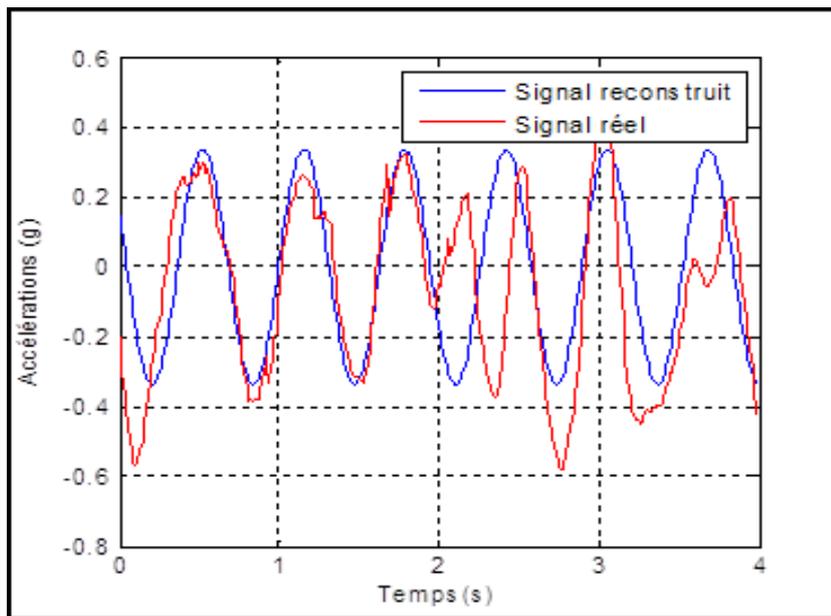


Figure 3. 20 Evolution des signaux réel et reconstruit pour un seul motif sinusoïdal

La reconstruction du signal de référence relatif à l'accéléromètre a été menée avec l'utilisation d'un seul motif élémentaire sinusoïdal. Les résultats trouvés prouvent la convergence de l'algorithme proposé. La méthode de reconstruction ainsi détaillée présente l'avantage d'offrir une connaissance du signal reconstruit en tant qu'amplitude, phase et fréquence. Ainsi, la possibilité de le définir à partir de ces paramètres à tout instant t devient possible.

Le nombre des motifs élémentaires utilisés peut être modifié. Ainsi, on peut reconstruire le signal avec plus qu'un seul motif. Dans ce contexte se déroule la suite de ce travail où la méthodologie abordée pour la reconstruction à partir d'un nombre de trois motifs élémentaires est abordée pour pouvoir comparer les résultats et choisir le nombre adéquat des motifs. Ainsi la reconstruction du signal de référence avec trois motifs élémentaires qui présentent les harmoniques les plus dominants est illustrée au niveau de la figure 3.21. Cette figure décrit l'évolution du signal de référence et celui reconstruit. Une corrélation entre ces deux signaux est constatée. Il est important de noter que le choix effectué pour un motif sinusoïdal est due principalement à la nature d'origine de ce dernier. Ainsi, uniquement dans le cas idéal le signal décrit une forme sinusoïdale parfaite. Néanmoins, des harmoniques s'ajoutent au niveau du signal, d'autant qu'il y a des perturbations

La reconstruction de l'accélération de référence relative à ce capteur a été réalisée à base d'un seul motif élémentaire sinusoïdal. Les résultats trouvés

prouvent la convergence de l'algorithme développé. La méthode de reconstruction ainsi détaillée présente l'avantage d'offrir une connaissance du signal reconstruit en tant qu'amplitude, phase et fréquence. Ainsi il est possible de définir le signal dit de référence uniquement avec les paramètres identifiés. D'autre part, il est possible de reconstruire le signal avec plus qu'un seul motif. À ce titre, la reconstruction est menée, dans ce qui suit, en utilisant trois motifs élémentaires.

Une reconstruction du signal de référence avec trois motifs élémentaires présentant les harmoniques les plus dominantes est illustrée au niveau de la figure 3.21 présentant l'évolution du signal de référence par rapport à celui reconstruit. Une corrélation entre les deux est bien constatée.

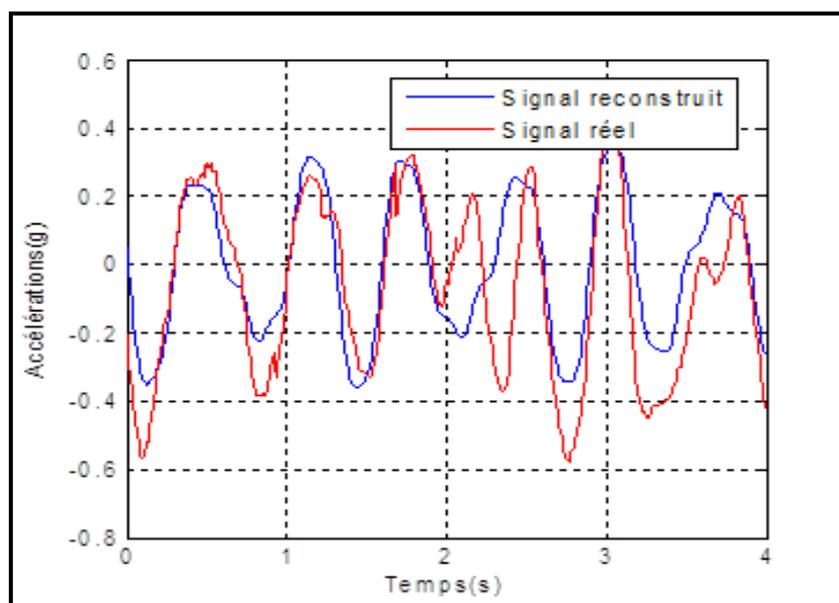


Figure 3. 21 Evolution des signaux réel et reconstruit (3 sinusoïdes)

Les résultats trouvés dans ce cas sont illustrés au niveau du tableau 3.5. Ils sont relatifs aux critères d'optimisation maximal, minimal et de variance. Ils permettent de souligner la convergence de l'algorithme. En effet, comme le montre le tableau 3.5 l'erreur relative aux valeurs maximale et minimale ne dépassent pas 3.4% et celle sur la variance est estimée à 3%.

Table 3. 5 Résultats d'optimisation relatifs aux critères d'optimisation

	Variance	Maximal	Minimal
Signal désiré	0.054	0.35	-0.35
Signal reconstruit	0.0542	0.3454	-0.3619
Erreur (%)	3%	1.3%	3.4%

L'évolution de la fonction de distribution statistique du signal reconstruit et de celui de référence est illustrée sur la figure 3.22.a). L'erreur relative correspondante ne dépasse pas 5% selon la figure 3.22.b).

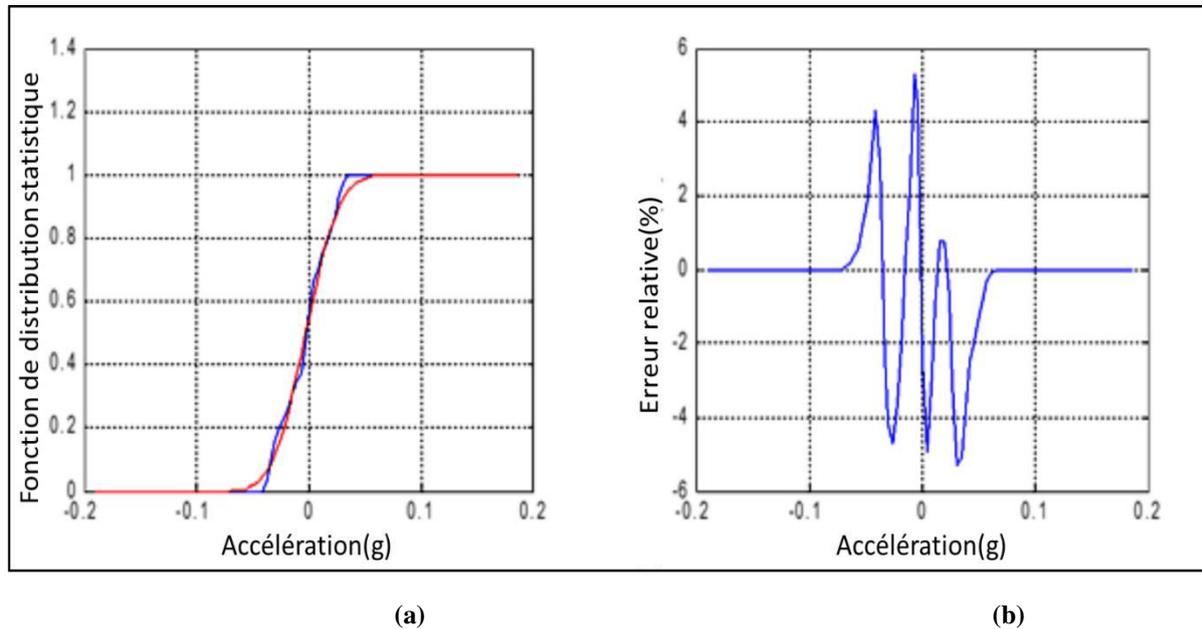


Figure 3.22.a. Evolution de la fonction de distribution statistique des signaux réel et reconstruit, b. Erreur relative à la fonction de répartition statistique

Les résultats obtenus permettent d'offrir un écart minimal par rapport à ceux de performance soulignant ainsi la bonne convergence de l'algorithme d'optimisation vers les meilleurs individus.

Les paramètres relatifs aux motifs élémentaires sont regroupés dans le tableau 3.6

Table 3. 6. Résultats d'optimisation relatifs aux critères d'optimisation

A_1 (g)	φ_1 (rad)	f_1 (Hz)	A_2 (g)	φ_2 (rad)	f_2 (Hz)	A_3 (g)	φ_3 (rad)	f_3 (Hz)
0.0725	0.7694	26.4	0.0686	0.1663	53	0.1225	2.1152	26.7

Au niveau de cette partie, les performances de la méthode proposée ont été testées pour différents cas. L'accent a été mis sur la capacité de l'approche proposée à modéliser un signal d'accélération issu des capteurs en technologies MEMS en présence des perturbations. En effet, selon l'ordre de complexité souhaité, l'approche de reconstruction peut être élaborée. La détermination des paramètres des motifs élémentaires dominants constituant le signal a été achevée moyennant l'AG.

3.3.4.3.2. Reconstruction du signal de référence pour $\Omega_2=13 \text{ rad/s}$

La même procédure de reconstruction du signal de référence développée précédemment est appliquée pour une deuxième valeur de vitesse ($\Omega_2 = 13 \text{ rad/s}$). Un seul motif élémentaire est utilisé dans ce cas. Les résultats relatifs au signal reconstruit et ceux du signal réel sont illustrés sur la figure 3.23 représentant l'évolution du signal issu du capteur ainsi que celui reconstruit. Les résultats obtenus soulignent la corrélation entre les deux signaux, notamment au niveau de la fréquence.

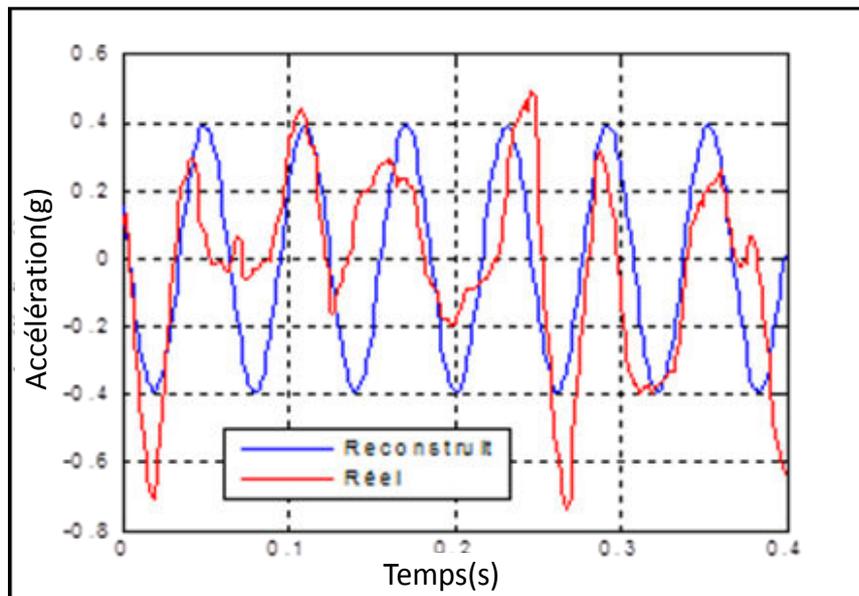
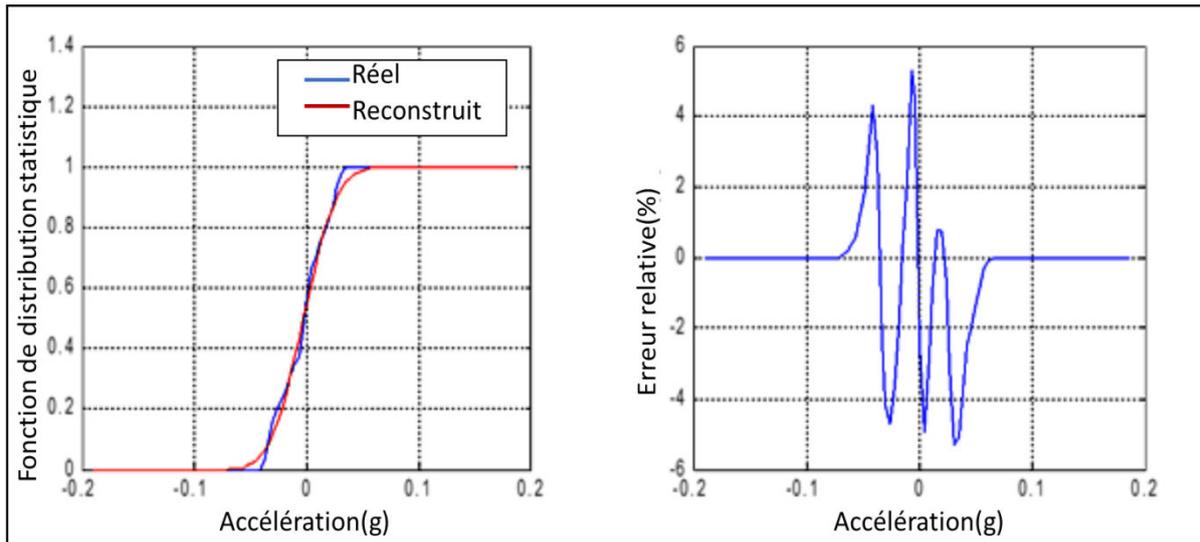


Figure 3. 23 Evolution du signal réel et de celui reconstruit (1 seul motif)

On procède de la même façon, pour évaluer la convergence de l'algorithme, une illustration de la fonction de distribution statistique des signaux de référence et réels est représentée par la figure 3.24.a. Cette figure souligne la bonne corrélation entre les deux signaux. Comme le montre la figure 3.24 .b l'erreur entre les deux est estimée à 5%.



(a)

(b)

Figure 3. 24 Evolution de la fonction de distribution statistique des signaux réel et reconstruit

Les autres critères de performance à savoir (max, min et variance) sont donnés par le tableau 3.7. Ces résultats révèlent la bonne convergence de l’algorithme. L’augmentation de la vitesse se manifeste par l’augmentation du taux de bruit.

Table 3. 7 Résultats relatifs aux critères de performances

	Variance	Maximal	Minimal
Signal désiré	0.0602	0.4	-0.4
Signal reconstruit	0.0655	0.3913	-0.3913
Erreur (%)	8.5	2.17	2.17

Les résultats relatifs à ce cas d’étude sont illustrés sur le tableau 3.8.

Table 3. 8 Paramètres identifiés du signal

A_1 (g)	φ_1 (rad)	f_1 (Hz)
0.3913	0.0165	2.7

3.3.4.3.3. Reconstruction du signal de référence pour $\Omega_3=17$ rad/s

Au niveau de cette partie, nous reproduisons la méthode de reconstruction pour une valeur de vitesse de rotation égale à 17 rad/s. A l’issue de cette phase, un nouveau signal de référence correspondant à cette valeur est déterminé.

Une représentation d'évolution du signal réel et celui reconstruit est illustré sur la figure 3.25.

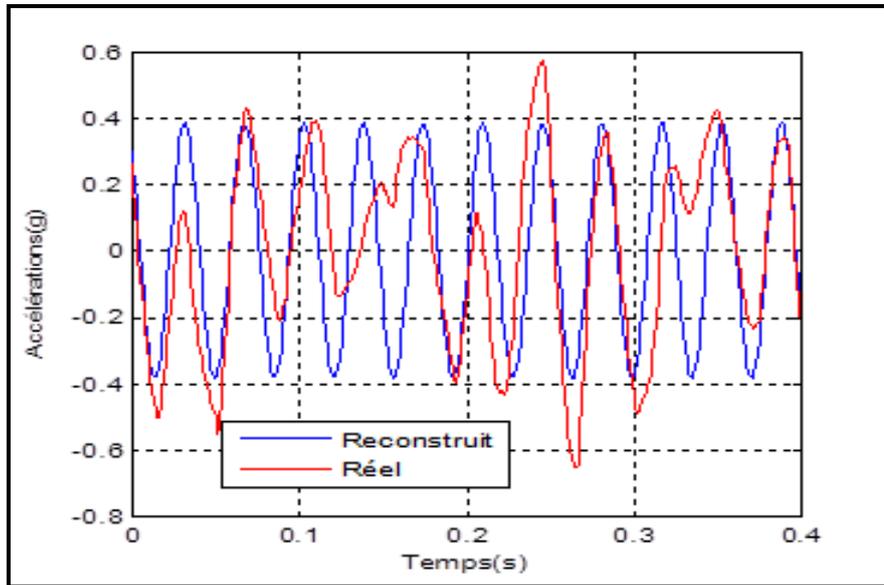
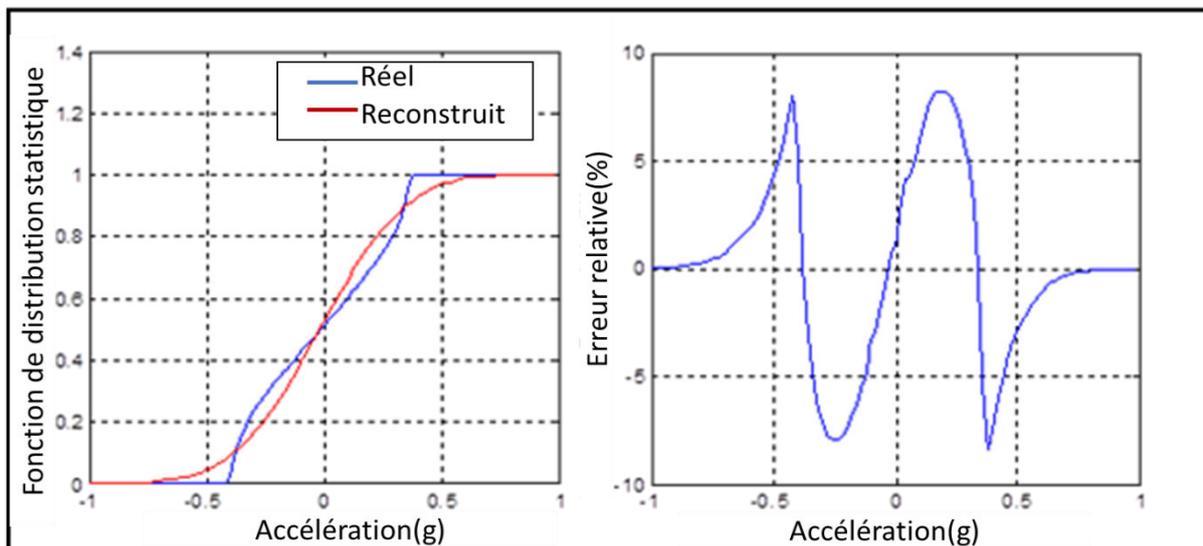


Figure 3. 25 Évolution du signal réel et de celui reconstruit

Pour souligner la convergence de l'algorithme une représentation d'évolution de la fonction de distribution statistique est illustrée sur la figure 3.26. Selon la figure 3.26.b l'erreur dans ce cas est estimée à 7%.



(a)

(b)

Figure 3.26.a Evolution de la fonction de distribution statistique du signal réel et celui reconstruit, b. Erreur relative de la fonction de distribution statistique

Les résultats obtenus pour ce cas d'étude sont bien illustrés au niveau du tableau 3.9 soulignant ainsi la convergence de l'algorithme proposé.

Table 3. 9 Résultats d'optimisation relatifs aux critères d'optimisation

	Variance	Maximal	Minimal
Signal désiré	0.0659	0.43	-0.43
Signal reconstruit	0.0724	0.4200	-0.4200
Erreur (%)	9.8	2.3	2.3

Ainsi, le tableau 3.10 illustre les différents résultats d'identification relatifs à une vitesse de rotation de 17 rad/s .

Table 3. 10. Résultats d'identification relatifs à un harmonique sinusoïdal cas de Ω_3

A_1 (g)	φ_1 (rad)	f_1 (Hz)
0.42	0.0281	2.2420

L'algorithme proposé a été utilisé pour reconstruire les accélérations de référence pour différentes vitesses de rotation. Par conséquent, les résultats obtenus pour chaque vitesse nous ont permis de définir un catalogue des signaux de référence. Celui-ci fera l'objet de la section suivante.

3.3.4.3.4. Catalogue des signaux de référence

Le catalogue des signaux de référence présente un récapitulatif des résultats d'identification obtenus (cf. Tableau 3.11) par la méthode de reconstruction définie auparavant et en appliquant un seul motif sinusoïdal.

Ainsi pour définir un système de génération automatique des paramètres $[A_n, f_n, \varphi_n]$ relatifs à n'importe quelle vitesse de rotation, nous proposons l'utilisation d'une structure neuronale simple.

Table 3. 11. Résultats d'identification pour différentes valeurs de vitesse

Ω (rad/s)	A (g)	φ (rad)	f (Hz)
10	0.3360	2.6821	1.58
13	0.3913	0.0165	2.240
17	0.42	0.0281	2.2420

3.4. CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, des nouvelles solutions de traitement des signaux issus des accéléromètres ont été proposées. Des comparaisons entre les approches a conduit à un choix de la méthode N°3 permettant une meilleure connaissance du signal. L'approche retenue se base essentiellement sur l'utilisation d'AG et elle ne requiert aucune connaissance particulière des bruits. Son impact sur l'amélioration des résultats de mesures est bien souligné. Après avoir testé la fiabilité des algorithmes dans le cas d'une communication filaire, l'accent est mis dans la suite de l'étude des signaux issus des accéléromètres en technologie MEMS dans le cas d'une communication sans fils.

CHAPITRE 4 : TECHNOLOGIE SANS FILS AU SERVICE DE LA SURVEILLANCE ET DU CONTRÔLE D'UN ACTIONNEUR TOURNANT



Résumé

Au sein de ce chapitre, un intérêt a été accordé à l'étude des signaux issus des capteurs dans le cas d'une communication sans fils. Ainsi, nous présentons les bancs expérimentaux de mesure de la vitesse de rotation des actionneurs tournants développés. Les traitements des signaux issus de notre système de capteurs à base des accéléromètres en technologie MEMS associé à un dispositif radio fréquence RF sans fils sont présentés.

En effet, la mise en place d'une liaison sans fils IEEE 802.11 (WIFI 2.4Ghz) permet de balayer les diverses causes de perturbations déjà signalées dans le cas de la connexion filaire. Cependant, une telle liaison est plus sensible à l'environnement électromagnétique du milieu fonctionnel du système étudié.

Les interférences rencontrées dans le cas de communication sans fils sont dues essentiellement aux obstacles (fixes ou mobiles), à l'effet multi-trajets, et à l'effet du masque qui conduisent à des évanouissements du signal et à des variations rapides de son amplitude et ils sont l'origine des erreurs de débit binaire (Bit Error Rate). Afin d'améliorer la fiabilité de la liaison et la précision de mesure de la vitesse de rotation instantanée de l'actionneur tournant, des algorithmes de reconstruction des signaux de référence ont été proposés.

Sommaire

4.1. INTRODUCTION.....	93
4.2. GENERALITE SUR LA PROPAGATION.....	94
4.2.1. PROPAGATION DANS L' ESPACE LIBRE	95
4.2.2. PROPAGATION PAR TRAJETS MULTIPLES.....	96
4.2.3. VARIATION DU CANAL DE PROPAGATION.....	96
4.2.3.1. Sélectivité spatiale	97
4.2.3.2. Sélectivité fréquentielle	97
4.2.3.3. Effet Doppler	98
4.2.4. PROBLEMATIQUE DE PROPAGATION DANS UN SYSTEME ELECTRIQUE TOURNANT ET FACTEURS INTERVENANT DANS LA PROPAGATION DANS UN ENVIRONNEMENT EN ROTATION	98

4.3. DESCRIPTION DU SYSTEME PROPOSE	100
4.4. CHOIX DE LA BANDE PASSANTE ET DU PROTOCOLE DE COMMUNICATION.....	102
4.5. ETUDE EXPERIMENTALE.....	104
4.5.1. MISE EN PLACE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	104
4.5.2. L'ACCELEROMETRE ADXL203	104
4.5.3. CARTE ARDUINO UNO.....	104
4.5.4. L'EMETTEUR ESP8266	105
4.5.5. SYNOPTIQUE DE LA BOUCLE DE TRANSMISSION.....	105
4.5.6. PROCEDURE DE RECUPERATION DES DONNEES ISSUES DE L'ESP8266	
107	
4.6. MISE EN PLACE D'UN DISPOSITIF SANS FILS DANS UNE MACHINE TOURNANTE	108
4.7. EVOLUTION DE LA VARIANCE D'ALLAN RELATIVE AUX ACCELERATIONS SANS FILS VIS-A-VIS DE LA VITESSE DE ROTATION DU MOTEUR	110
4.7.1. VARIANCE D'ALLAN A VITESSE CONSTANTE.....	110
4.7.2. EVOLUTION DE LA VARIANCE D'ALLAN POUR DES MULTIPLES VALEURS DE VITESSE	111
4.8. DETERMINATION DE LA VITESSE DE ROTATION D'UNE MCC A BASE DES CAPTEURS SANS FILS	112
4.9. RECONSTRUCTION DU SIGNAL D'ACCELERATION DE REFERENCE	114
4.9.1. CHOIX DES CRITERES DE PERFORMANCES	116
4.9.2. RECONSTRUCTION D'ACCELERATION D'UNE VITESSE 27RAD/S.....	117
4.9.3. RECONSTRUCTION D'ACCELERATION D'UNE VITESSE DE 33 RAD/S.	119
4.9.4. RECONSTRUCTION D'ACCELERATION D'UNE VITESSE DE 39 RAD/S.	119
4.9.5. GENERATION DES SIGNAUX DE REFERENCES.....	120

4.10. CONCLUSION 120

4.1. INTRODUCTION

Les avancées technologiques en termes de performances et de miniaturisation, réalisées dans le domaine des microsystemes et des dispositifs de communications permettent de concevoir une nouvelle variante de « capteurs intelligents ». Ces dispositifs ouvrent la voie à des solutions économiquement intéressantes dans divers domaines, comme la surveillance à distance et le traitement des données complexes dans les environnements hostiles [KOR 10]. La demande croissante de systèmes de capteurs sans fils est de plus en plus soulignée. Selon « A Market Dynamics Report » (5^{ème} édition) publié chez ON WORD [HAL 12], plus que 25 millions de capteurs et d'actionneurs sans fils seront installés d'ici la fin de l'année 2016. Ce déploiement à grande vitesse est dû essentiellement aux avantages qu'un tel dispositif peut offrir par rapport à ceux en technologie filaire comme la réduction du prix d'installations, la simple mise en œuvre et la facilité d'intégration dans les équipements. Dans le cas de la machine tournante, élément de base des systèmes d'entrainements électriques, le remplacement des capteurs filaires par des autres sans fils offrent un gain important en termes de coût d'installation, fiabilité et robustesse du système d'entrainement.

Récemment, de multiples travaux de recherches ont été menés dans ce domaine par exemple ceux de Lotfi Bagli [BAG 10], de Alfred Binder [BIN 11], de Perissis Eleftherios [ELE 12] ou encore ceux de Liqun Hou [HOU 12]. Ces travaux ont conduit à des solutions diverses de contrôle sans fils des dispositifs tournants.

Au cours de ce chapitre, une approche complète de contrôle et de surveillance à distance est développée et une structure simplifiée de capteurs intelligents est proposée. La solution développée peut être améliorée pour être accessible via les réseaux internet.

Deux bancs de test ont été mis en place pour la validation expérimentale de l'approche proposée. Un premier est à base d'une machine à courant continu (MCC) et un second est à base d'une machine asynchrone (MAS). Le présent chapitre est organisé en trois sous chapitres. Dans le premier, le concept général de la propagation Radio Fréquence(RF) est présenté. Ensuite, dans le second sous chapitre, la solution proposée, les dispositifs matériels et logiciels mis en place sont détaillés. Le troisième sous chapitre, est dédié à la validation du concept proposé

4.2. GÉNÉRALITÉS SUR LA PROPAGATION

Dans un contexte général, un système de télécommunication sert à assurer la transmission des informations entre deux dispositifs spatialement espacés. Deux exigences principales doivent être prises en compte pour la mise en place d'un tel dispositif. Le premier est la fiabilité de la transmission, et le second est leur coût qui doit être relativement faible. La chaîne de transmission, dans sa structure fonctionnelle la plus simple, est constituée essentiellement d'un émetteur, d'un canal de transmission et d'un récepteur.

Le canal de propagation représente le système faisant passer un signal $e(t)$ en un signal $s(t)$ en tenant compte des interactions entre les ondes électromagnétiques et l'environnement comme le montre la figure 4.1.

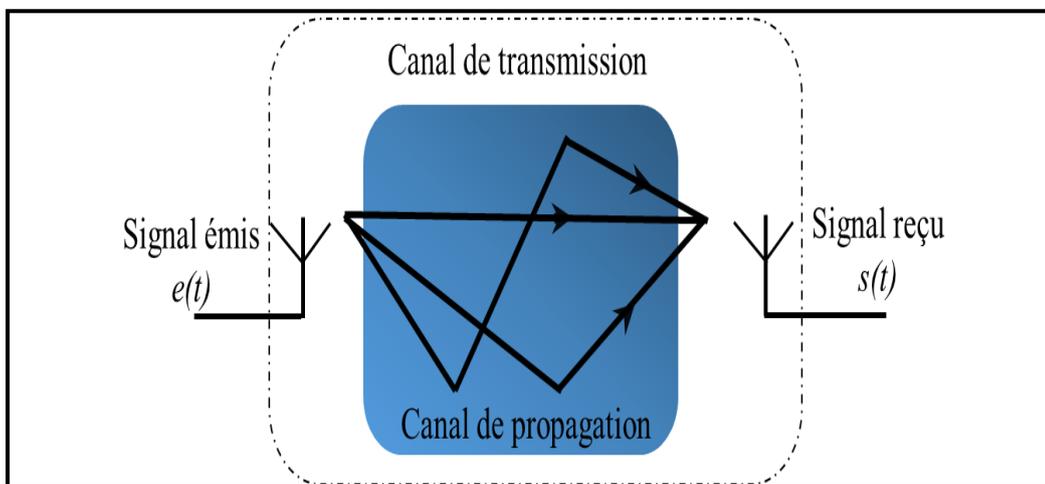


Figure 4. 1 Canal de transmission

Contrairement à la communication filaire, où l'information est véhiculée à travers un signal électrique (onde électromagnétique) transmis à travers un câble, la communication radio fréquence(RF) utilise la propagation d'une onde dans l'atmosphère. Cette onde se propage selon une ligne droite dans plusieurs directions depuis sa source d'émission. Sa vitesse dans le vide est de $3 \cdot 10^8$ m/s. La nature de l'environnement de l'application affecte considérablement la qualité du signal ainsi en parcourant un trajet entre l'émetteur et le récepteur, le signal transmis est sujet à de nombreux phénomènes qui dégradent sa qualité et qui peuvent engendrer des erreurs au niveau des messages transmis.

4.2.1. Propagation dans l' espace libre

Ce type de propagation représente le cas idéal car le système de transmission est situé dans un environnement exempt de tous types de perturbations [PAR 00]. L'expression de la densité de puissance du signal W et la puissance disponible au niveau de l'antenne dans ce cas est décrite selon l'équation 4.1

$$W = \frac{P_E \cdot G_E}{4\pi \cdot d^2} \quad 4.1$$

Avec :

- G_E : gain de l'antenne d'émission,
- P_E : puissance du signal émis,
- d : distance entre l'antenne d'émission et de réception.

La puissance du signal reçu par l'antenne de réception caractérisé par un gain G_R qui s'exprime par l'équation 4.2.

$$P_R = \frac{\lambda^2 \cdot G_R}{4\pi} \quad 4.2$$

avec

- λ : longueur d'onde.

Les paramètres situés au niveau des équations 4.1 et 4.2 conduisent à la formule de FRIS, permettant le calcul d'atténuation en espace libre

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T \cdot G_R \cdot \left(\frac{c}{4\pi f d} \right)^2 \quad 4.3$$

Il est noté que cette relation n'est valable que si d est grand donc pour une antenne située dans un champ lointain par rapport à la source. Dans le cas des communications sans fil, les facteurs affaiblissant le signal dépendent essentiellement de la fréquence f et de la distance d (expressions 4.3). Ainsi, la perte de propagation, est mesurée par la différence entre la puissance du signal émis et celle du signal reçu. Elle est faible pour les fréquences basses et plus importantes pour ceux importants. La propagation dans l'espace libre représente un cas théorique puisque dans les conditions réelles de propagation, l'environnement du système de transmission interfère avec l'onde transmise selon différents aspects.

4.2.2. Propagation par trajets multiples

Dans le cas d'une communication sans fils, l'onde est transmise via l'atmosphère donc elle est susceptible aux interférences affaiblissant le signal transmis et conduisant à sa propagation selon plusieurs trajets. Le signal obtenu, au niveau de l'antenne réceptrice dans ce cas, correspond à une recombinaison des multiples ondes (atténuées et retardées relativement à la longueur du trajet). La propagation en trajets multiples peut mener à une distorsion importante du signal reçu particulièrement dans le cas de trajet caractérisé par une non visibilité directe (Non Line Of Sight). Le concept de propagation en multi-trajets est illustré sur la figure 4.2 où les principaux phénomènes de propagation à savoir la réflexion, la diffusion, le guidage d'ondes et la diffraction sont détaillés.

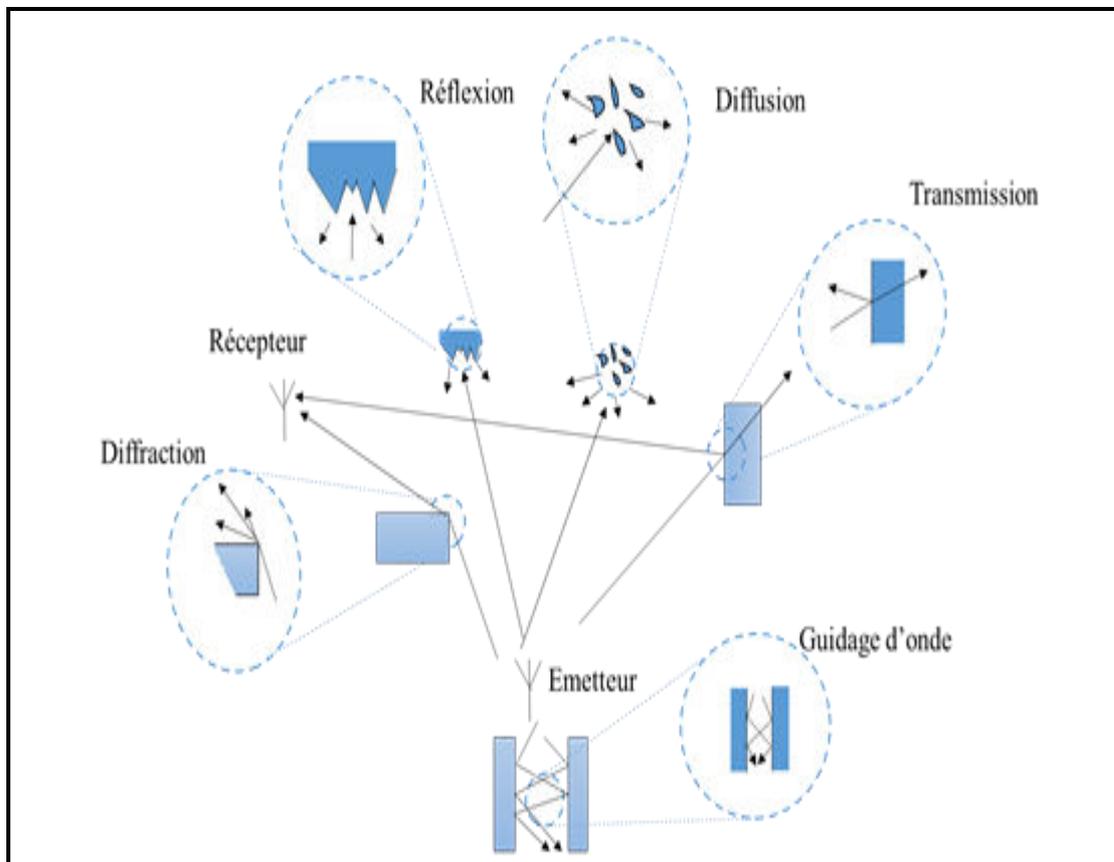


Figure 4. 2 Mécanismes de propagation

4.2.3. Variation du canal de propagation

Les interactions entre les ondes radioélectriques et leurs milieux de propagation engendrent des variations au niveau des caractéristiques du canal de propagation selon plusieurs échelles. Ainsi, la présence des obstacles dans l'environnement provoque, en fonction de la distance entre l'émetteur et le

récepteur, des atténuations supplémentaires des amplitudes des ondes transmises. Il est noté que les fluctuations rapides du signal à la réception sont dues à la recombinaison de multiples répliques d'un même signal à des instants différents. Ces phénomènes dépendent de la fréquence utilisée d'une part et de la nature des obstacles rencontrés d'autre part (verre, métal, béton etc.). Les dégradations de l'onde électromagnétique transmise en RF peuvent être classées selon différentes catégories dont les principales sont les suivantes :

- ✓ Les pertes de propagation, ou l'affaiblissement lors du parcours (pathloss) qui sont dues à la distance parcourue par l'onde radio.
- ✓ Les atténuations de puissance du signal qui sont dues aux effets de masquage (shadowing) provoqués par les obstacles sur le trajet parcouru entre l'émetteur et le récepteur.
- ✓ Les évanouissements (ou fading) dans la puissance du signal dus aux nombreux effets induits par le phénomène de multi trajet.
- ✓ Les brouillages dus aux interférences (co-canal ou sur canal adjacent) créés par d'autres émissions.

4.2.3.1. Sélectivité spatiale

Généralement, le signal est composé d'une fréquence porteuse pure se propageant selon deux trajets, direct et réfléchi. Dans le cas où la réflexion s'est produite à proximité de la ligne de visibilité directe, les deux trajets présentent des atténuations similaires. Cependant, dans les autres cas, selon la longueur d'onde du signal émis et la différence de marche des signaux, ils peuvent arriver en phase ou en opposition de phase. Selon leurs états à l'arrivée, ils s'additionnent d'une façon constructive (un gain de puissance) ou destructive (la puissance totale reçue s'affaiblit considérablement). Ainsi, dans le cas d'un émetteur mobile, la rotation et le changement des phases des trajets conduisent à une succession de maxima et de minima et des évanouissements rapides. De plus, si ce phénomène se produit sur un grand nombre de trajets, le signal reçu s'apparente à un processus aléatoire.

4.2.3.2. Sélectivité fréquentielle

Contrairement au phénomène de sélectivité spatiale, qui dépend de la phase, celle fréquentielle dépend essentiellement de la fréquence. Ainsi, lorsque la bande de fréquences est étroite, toutes les composantes fréquentielles du signal subissent les mêmes variations de phase, et des évanouissements de puissance constants sur

toute la bande étudiée. Cependant, pour les signaux occupant une large bande de fréquences, les composantes fréquentielles sont affectées différemment, si bien que le signal reçu présente une certaine distorsion par rapport au signal émis. L'évanouissement sélectif en fréquence, se manifeste donc par une variation de la puissance reçue en fonction de la fréquence. La largeur de bande sur laquelle les composantes spectrales du signal sont affectées de la même manière est appelée bande de cohérence ou bande de corrélation. Dans le domaine des retards, la sélectivité fréquentielle se manifeste par un délai de l'ordre de la nanoseconde entre les divers échos du signal qui ont emprunté des trajets différents.

4.2.3.3. Effet Doppler

L'effet Doppler correspond au décalage apparent de la fréquence d'un signal électromagnétique. Il est provoqué par le changement de son trajet de propagation, et il est dû à un état de déplacement de l'antenne d'émission ou de réception ou les deux à la fois. Un cas d'exemple simple est pris en considération. Ainsi, l'onde plane arrive avec un angle α au niveau d'un récepteur en mouvement de vitesse constante v . Le décalage Doppler observé dans ce cas est décrit selon l'expression 4.4

$$f_d = f \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos \alpha = f \cdot \frac{1}{c \times \lambda} \cdot \cos \alpha \quad 4.4$$

L'onde arrive au récepteur avec une fréquence $f_0 + \mu$ avec μ représente le décalage Doppler. Selon la valeur de l'angle d'arrivée, le décalage doppler est reparti sur $[-f_d^{\max}; f_d^{\max}]$ où f_d^{\max} représente le décalage Doppler max ($\alpha = 0$).

4.2.4. Problématique de propagation dans un système électrique tournant et Facteurs intervenant dans la propagation dans un environnement en rotation

Malgré les avantages qu'une communication radio offre par rapport à une liaison filaire particulièrement dans le cas des machines tournantes où les fils sont très encombrants et les emplacements des capteurs sont restreints. Cette communication présente certaines limites qui sont liées principalement à la sensibilité du canal de transmission aux perturbations extérieures. D'autre part, la «machine électrique tournante» représente un environnement complexe dans la mesure polyvalente des matériaux diélectriques et métalliques qui la composent et de sa dimension poly-variantes. Tous ces facteurs, augmentent la complexité du canal de propagation radio fréquence d'une part et affectent considérablement la couverture électromagnétique. Afin de présenter les caractéristiques relatives à la

propagation de l'onde électromagnétique dans un environnement en rotation, nous nous référons à l'étude menée dans [LEN 08]. Des considérations ont été prises en compte, dans ce cas. Ainsi, l'émetteur tournant, est placé dans le plan (XOY) et le récepteur est supposé fixe. Les angles de rotation selon lesquels l'antenne émettrice évolue sont représentés sur la figure 4.3.

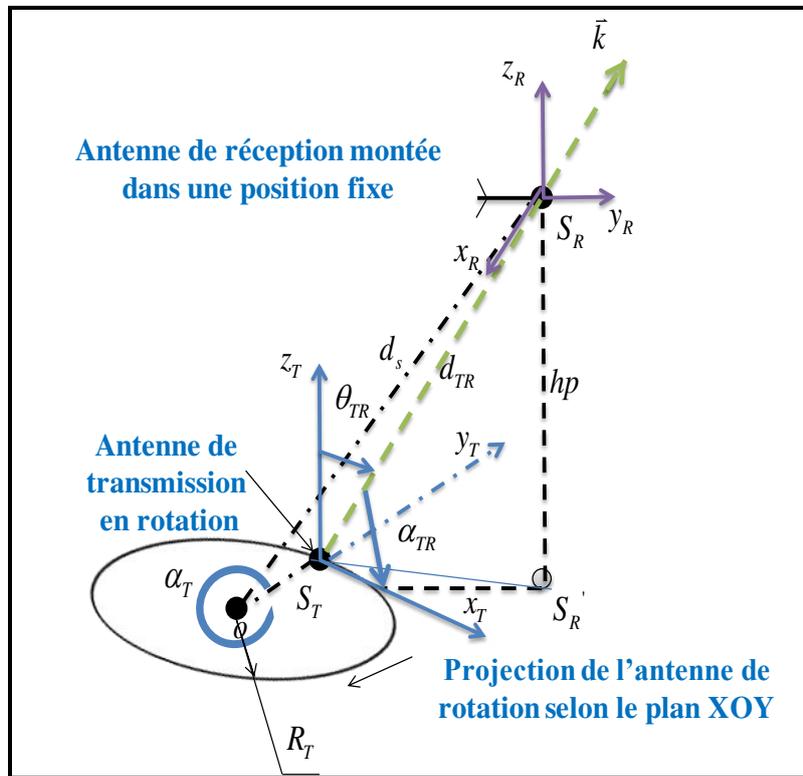


Figure 4. 3 Relation liant les positions et les angles relatifs aux antennes émettrice et réceptrice

Avec :

- S_T : la position de l'émetteur,
- S_r : la position du récepteur
- S_r' : la projection selon le plan XOY,
- V_T : la vitesse linéaire,
- R_T : le rayon de rotation
- w_n : la vitesse de rotation de l'émetteur.
- h : hauteur de projection.

L'émetteur décrit une variation de l'angle selon l'équation 4.5.

$$\alpha_T(t) = v_T \cdot \frac{t}{R_T} + \alpha_0 \quad 4.5$$

A $t = 0$, l'angle initial de l'émetteur est α_0 .

L'angle de l'espace entre la direction de l'émetteur et celle de l'onde incidente au niveau de la réception est décrit selon l'équation 4.6. Cette équation permet de souligner la relation entre l'angle séparant l'émetteur et l'onde incidente avec le rayon de la rotation, la vitesse linéaire, l'angle de rotation et la hauteur de projection.

$$\cos \alpha_{TR}(t) = \sin \alpha_T(t) \sqrt{\frac{(d_0^2 - h^2)}{d_0^2 + R_T^2 - 2R_T \sqrt{d_0^2 - h^2} \cos \alpha_T(t)}} \quad 4.6$$

Il est noté d'après l'équation 4.6 qu'une variation de la vitesse linéaire et de l'angle de rotation affecte le paquet transmis. Dans ce contexte, nous proposons la mise en place d'un dispositif expérimental permettant d'étudier les problèmes rencontrés et de proposer des solutions aboutissant à des performances meilleures.

4.3. DESCRIPTION DU SYSTÈME PROPOSÉ

Actuellement, la technologie sans fils présente un essor prodigieux dans diverses applications à savoir le transport (terrestres, aériens, etc) ; les réseaux de distribution d'énergies « Smart Grid » [MEL 10] [OND 13], la défense [PEJ12] et la médecine (surveillance à distance des patients)[FUR 11]. Dans le cas de machines électriques tournantes, l'émergence vers les technologies radio fréquences (RF) pour le contrôle et la surveillance des machines électriques tournantes offre plusieurs avantages en termes de mobilité, coût et fiabilité. Un appel à une technologie sans fils dans ce cas permet de soulager les limites des applications filaires en tant qu'encombrement et coût. Des travaux ont été déjà effectués dans ce contexte comme celle de [PAT 14] qui a proposé une solution sans fils pour la mesure des paramètres électriques d'une machine tournante tels que les courants statoriques, la tension, et la température. Ces différentes données sont collectées avec un DSPIC 30F4013 avant de les transférer à l'aide d'un routeur Zigbee vers un ordinateur. D'autre part, une solution sans fils de surveillance d'un défaut de rupture des barres pour une machine tournante a été étudiée par [REZ 15].

Dans [BAY 11], l'auteur a introduit une nouvelle approche de surveillance des courants statoriques basée sur le microcontrôleur JN 5139. Un système de mesure sans fils de couple dédié pour une machine tournante a été présenté au niveau de [NIS 11]. Au cours de ce travail, un dispositif de contrôle à distance d'une machine

tournante a été développée. La figure 4.4.présente le schématique général de la solution proposée.

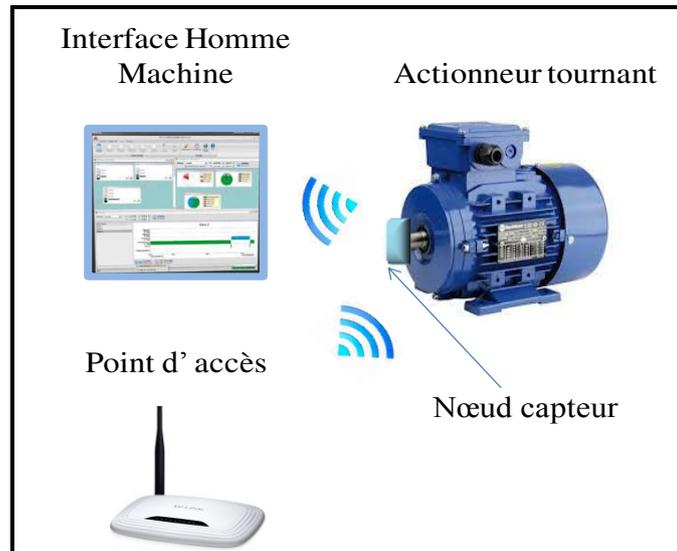


Figure 4. 4 Synoptique du système de communication proposé

Les composants de bases de la solution proposée sont les suivants :

- **La machine électrique tournante** présentant l'élément qu'on veut superviser et contrôler.
- **Le nœud capteur** représente le dispositif permettant de capter, traiter et envoyer les données. Il est composé essentiellement de six parties essentielles:
 - ✓ Les capteurs: des accéléromètres en technologie MEMS ont été utilisés. Ils sont placés sur une tige issue de l'axe du moteur. Cette position leur permet de suivre les différents états de rotation du moteur. Ainsi, ils génèrent à leurs sorties un signal analogique d'accélération qui est utilisé pour la détermination de la vitesse.
 - ✓ Le microcontrôleur: il permet de gérer le temps, traiter et numériser les données mesurées par le capteur.
 - ✓ La batterie: quatre piles AA assurent l'alimentation des circuits électroniques et des capteurs.
 - ✓ L'émetteur RF: il permet de moduler les données (ASK) et de transmettre les trames construites (fréquence de fonctionnement)

- ✓ L'antenne RF: son rôle consiste à rayonner de manière isotrope indépendamment de la position angulaire de l'arbre du moteur pour assurer la liaison RF vers le récepteur. Sa conception constitue un vrai challenge de miniaturisation aux fréquences utilisées.
- **Le point d'accès (DLINK)** (norme WiFi 802.11) assure la connexion entre les différents dispositifs. Il est caractérisé par
 - ✓ Sa Sensibilité à la réception et sa puissance de sortie.
 - ✓ Les topologies supportées (AP, Bridge, AP Client, répéteur,...)
 - ✓ Les Services supplémentaires (DHCP, routage, filtrage des clients, 802.11,...)
 - ✓ Exemple du Cisco et du Dlink.
- **L'Interface Homme Machine** elle a été développée sous LABVIEW afin d'assurer la récupération des données issues des capteurs

4.4. CHOIX DE LA BANDE PASSANTE ET DU PROTOCOLE DE COMMUNICATION

Le choix de la bande passante a été guidé par la recherche de celle permettant un accès libre en Europe et tout le monde entier. En effet, la bande 2.4GHZ est une bande ISM et son utilisation est très répandue pour les différents protocoles de communication comme le Bluetooth, le Wifi et le Zigbee. D'autre part, le choix du standard de communication se base essentiellement sur la recherche des caractéristiques principales relatives à ceux-ci à savoir la fréquence de transmission, le débit, les applications visées et la complexité. Nous nous sommes intéressés au niveau du présent travail à la norme WiFi 802.11, débit de 1Mbps (indoor) à 54Mbps (outdoor), avec une portée typique (distance maximale parcourue par l'onde) de 20m à 50m. Les paramètres d'expérimentation qui sont utilisés au cours de notre travail sont illustrés au niveau du Table 4.1

Table 4. 1 Valeurs de performances sans fils

Modulation	PBSK
Débit	1Mbps
Bande de fréquence	2.4GHz
Puissance émise	17 dBm
Gain d'antenne	3 dB
Seuil de détection	-80 dBm
Sensibilité de récepteur	-92 dBm
Température	290K
Figure de bruit	10dB
Canal	Two ray, Ricean
Fréquences d'excitation du canal de captage	$1/15 \cdot 10^3$ Hz
Consommation d'énergie TX radio	1650 mW/s @ 5V
Consommation d'énergie RX radio	1400mW/s @ 5V

Table 4. 2 Performances du protocole utilisé

Protocole	802.11
Fiabilité	0.9
Latence (sec)	6.3E-0.2
Consommation d'énergie/capteur (mWh)	47.28

Il faut noter que la sensibilité de l'antenne représente le plus petit niveau de puissance détectable par celle-ci. Le seuil de détection indique le niveau de puissance à partir duquel l'interface radio est capable de décoder un signal, et de caractériser le récepteur. Le gain et la puissance rayonnée sont choisis afin d'avoir une puissance isotrope rayonnée EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) de 100mW soit 20dBm. La figure de bruit NF (Noise Figure) est une mesure de la

diminution du SNR causée par les composants Radio Frequency (RF) et elle est décrite selon la relation 4.7

$$NF_{(dB)} = SNR_{indB} - SNR_{outdB} \quad 4.7$$

4.5. ETUDE EXPÉRIMENTALE

4.5.1. Mise en place du dispositif expérimental

Un choix des dispositifs expérimentaux nécessaires pour assurer le, traitement et transmission des signaux sans fils a été effectué. Les parties de base du système de communication sans fils choisi, sont reportés sur la figure 4.5. Le dispositif expérimental en question est constitué principalement d'un accéléromètre ADXL203, un microcontrôleur Arduino et d'un émetteur ESP8266.

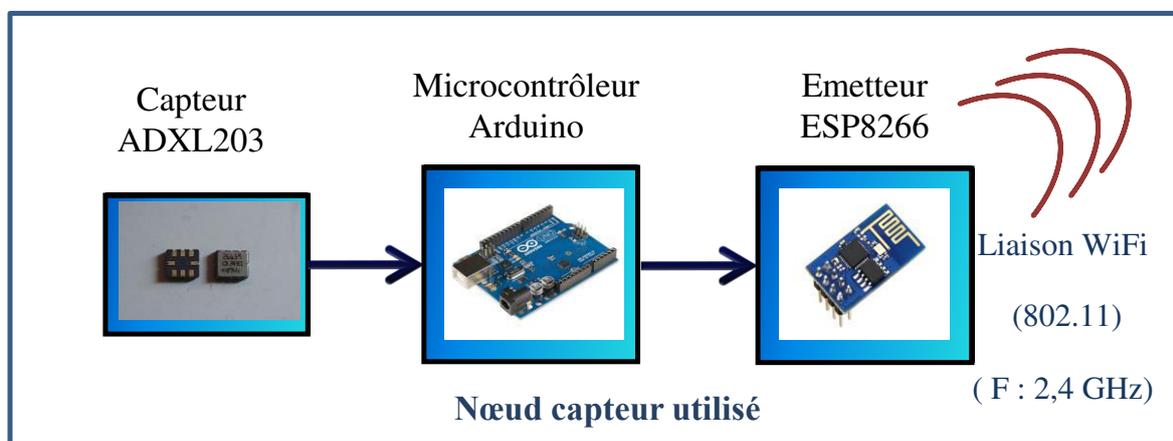


Figure 4. 5 Présentation générale des dispositifs expérimentaux utilisés

4.5.2. L'Accéléromètre ADXL203

L'accéléromètre ADXL203 en technologie MEMS [1] a été choisi pour accéder à l'information de la vitesse d'une machine tournante. Ainsi, à partir des accélérations issues des capteurs, une détermination de la vitesse est effectuée. Le fonctionnement du capteur et l'approche de détermination de la vitesse ont été déjà développés et testés dans le cas de communication filaires (au niveau de chapitre 3) et cette même approche est retenue pour le cas d'une communication sans fils.

4.5.3. Carte Arduino Uno

L'arduino uno présente une carte microcontrôleur contenant comme cœur le microcontrôleur à ATmega 328 de la famille AVR (mémoire flash 32Ko, données volatiles 2Ko, EEPROM 1Ko). Il comprend 14 broches d'entrées et sorties numériques et 6 entrées analogiques. Cette carte contient également un oscillateur

avec un quartz de 16Mhz. Il est noté que le choix a été effectué sur cette carte pour le traitement des signaux issus des accéléromètres vu la simplicité de sa mise en place et surtout qu'elle offre un environnement de développement open source.

4.5.4. L'émetteur ESP8266

L'émetteur ESP8266 est un module WiFi (802.11) autonome et qui est caractérisé par son faible coût, sa petite taille et intégrant une pile de protocole TCP/IP. Il permet d'offrir une connexion WiFi à n'importe quel microcontrôleur. D'autre part, ce module permet d'instaurer une liaison WiFi (802.11) complète et autonome avec le microcontrôleur Arduino. Il utilise une liaison série TX/RX pour recevoir et envoyer les données. Mis à part sa simplicité de mise en œuvre, ce dispositif répond aux besoins de l'application envisagée en termes de capacité de stockage des données. Ainsi, l'effet d'être équipé d'un processeur embarqué puissant, lui permet d'offrir un temps de réponse minimal [BEN 14]. La connexion entre les deux cartes Arduino et l'émetteur ESP8266 est réalisée comme le montre la figure 4.6.

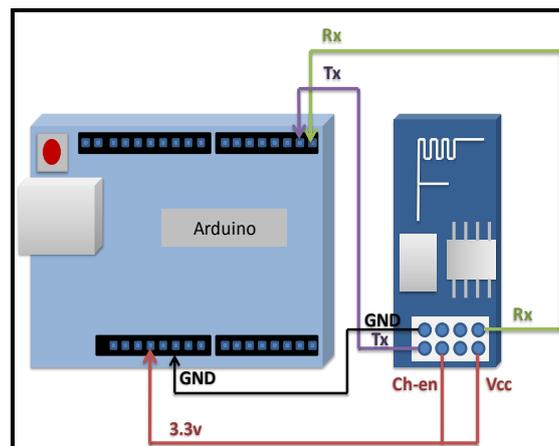


Figure 4. 6 Connexion entre la carte arduino et l'émetteur ESP8266

4.5.5. Synoptique de la boucle de transmission

La boucle de transmission est constituée essentiellement d'un émetteur (circuit d'émission, d'un point d'accès (antenne et module WiFi), un routeur et d'un PC (voir figure 4.7).

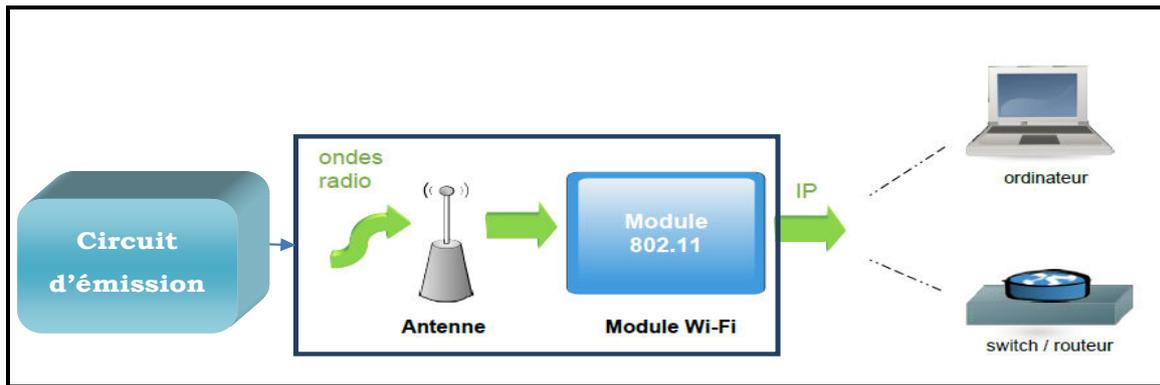


Figure 4. 7 Synoptique de la boucle de transmission

Le routeur TP-Link (TL-WR740N) a été utilisé pour assurer le routage des paquets IP transmis. Initialement, l'émetteur ESP8266 est configuré pour se connecter au routeur TP-Link. A sa connexion, une adresse IP lui est accordée (192.168.1.100). D'autre part, le PC (console de récupération) est connecté au même routeur (IP 192.168.1.101) comme l'illustre la figure 4.8.

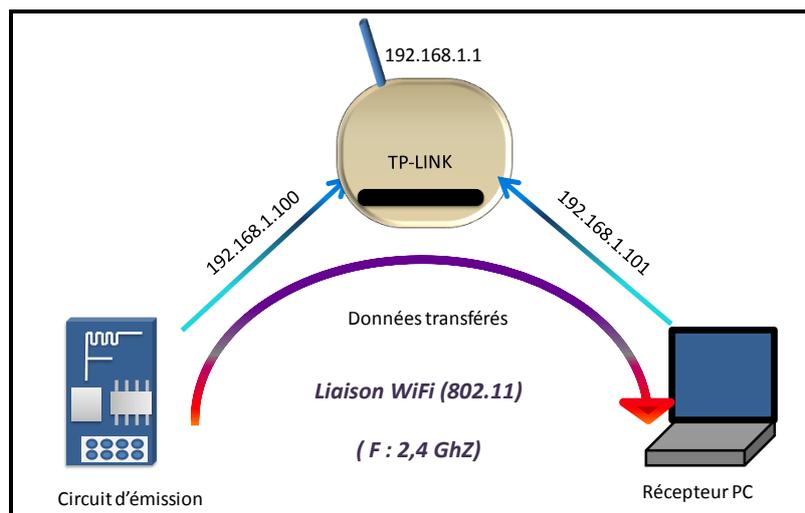


Figure 4. 8 Schéma synoptique de la boucle de transmission

L'émetteur ESP8266 envoie les accélérations mesurées vers une page web configurée sur la console de réception (PC dans notre cas). L'émetteur et le microcontrôleur sont programmés sur arduino et le programme de récupération des données a été développé sur Php. Initialement, les données sont récupérées sur la page web. Par la suite, elles sont transmises vers une page Excel où elles sont stockées. A partir de ces données, des traitements sont effectués comme le montre la figure 4.9. Le point d'accès (AP) utilisé sert comme lien entre les ressources utilisées pour s'y connecter afin de diffuser le signal sans fil.

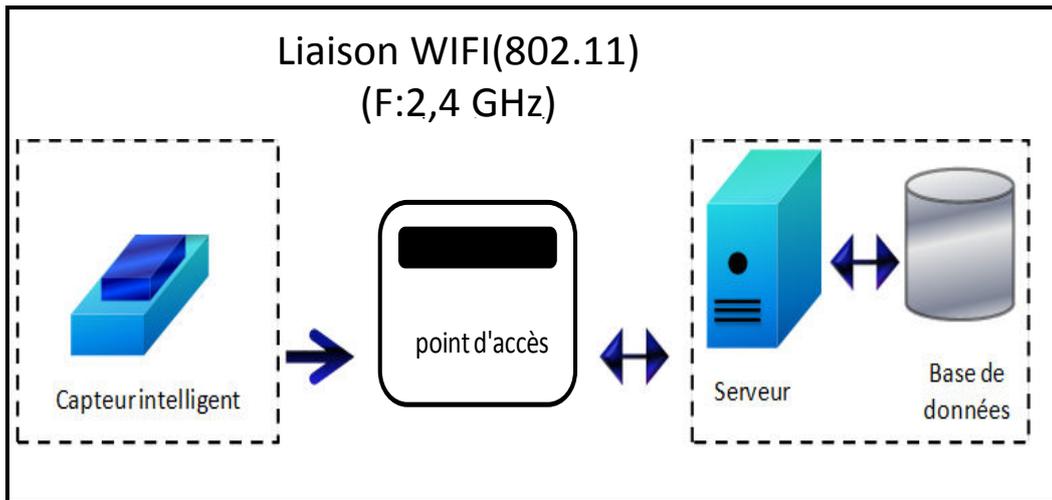


Figure 4. 9 Schéma illustrant la communication directe entre client et serveur

4.5.6. Procédure de récupération des données issues de l'ESP8266

La récupération des données issues des capteurs sans fils a été effectuée sur une page web en premier lieu afin de tester la réussite de transmission. L'organigramme de la figure 4.10, illustre les étapes achevées pour la création de la page web. Initialement, un serveur web local, « XAMP » a été utilisé. Ensuite, une base de données a été créée sur php-MyAdmin. La connexion à cette base de données ainsi que la récupération des accélérations ont été effectuées grâce au programme développé sur php [voir Annexe D].

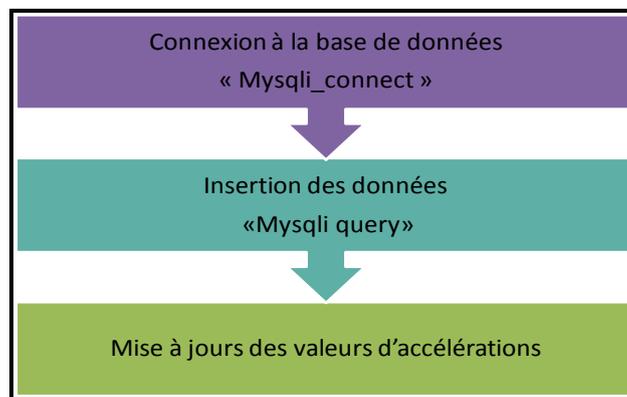


Figure 4.10 Logigramme illustrant les principales étapes menées pour la récupération des données d'accélérations

La réussite de la création de la base de données et la bonne récupération des valeurs d'accélérations sont bien soulignées sur la figure 4.11. Cette figure représente la page web sur laquelle s'affiche un tableau de récupération des données. Les valeurs affichées sont relatives aux accélérations dues au déplacement de l'ensemble (émetteur et capteur) prouvant ainsi la réussite de

l'opération de récupération. Les valeurs affichées sur la page web sont par la suite transmises vers une Interface Homme Machine développée sur LABVIEW.

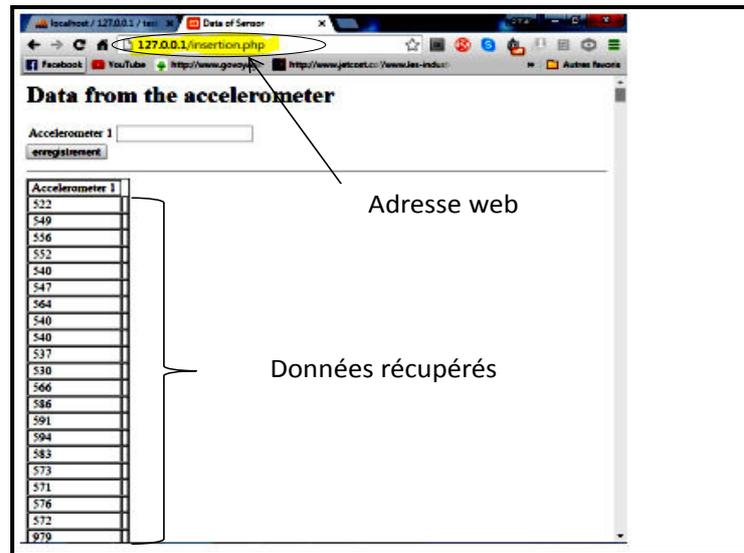
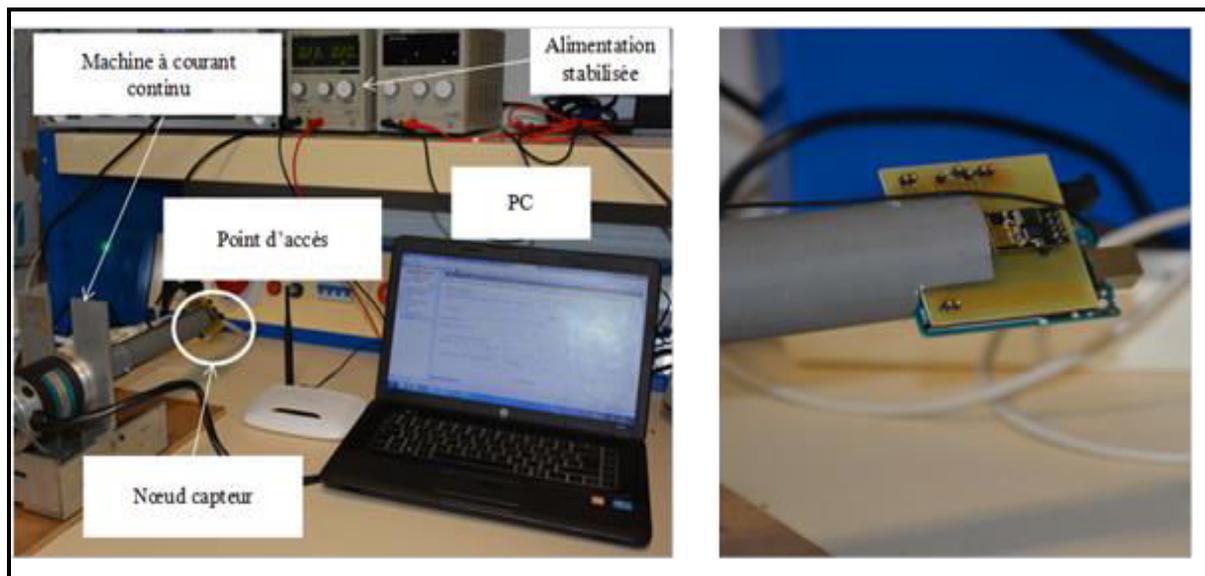


Figure 4. 11 Test de faisabilité et signaux récupérés via une page web

4.6. MISE EN PLACE D'UN DISPOSITIF SANS FILS DANS UNE MACHINE TOURNANTE

Après la mise en place des outils nécessaires pour la communication sans fils, le nœud capteur (i.e capteur, unité de traitement et émetteur) est installé au niveau de l'axe de rotation du moteur à courant continu. L'étude dynamique consiste à récupérer le signal d'accélération issu du capteur (relatif à un certain état de rotation) et ensuite, à déduire la valeur correspondante de la vitesse de rotation du moteur MCC. Comme l'illustre la figure 4.12, le banc de test utilisé est composé essentiellement d'un moteur à courant continu (MCC), nœuds capteurs et un PC pour la récupération des signaux issues des capteurs. Pour minimiser la consommation énergétique des capteurs, l'émission est achevée uniquement pendant l'état de rotation. Le système proposé permet le contrôle à distance de la machine et la gestion des signaux délivrés par les capteurs.



(a)

(b)

Figure 4. 12 a. Banc de test expérimental utilisé pour la récupération des données sans fils, b. Zoom nœud capteur

La récupération des accélérations issues de capteurs a été effectuée pour des multiples valeurs de vitesse de rotation afin de tester la fiabilité du dispositif expérimental proposé. D'autre part, afin de déterminer la valeur des vitesses relatives aux signaux récupérés l'algorithme déjà détaillé précédemment dans le cas filaire (cf. Chapitre 3, paragraphe 3.3) est utilisé. Ainsi, il est noté que pour une vitesse estimée à 27 rad/s, le signal d'accélération correspondant à cet état de rotation est représenté sur la figure 4.13. L'accélération varie entre -0.4g à 0.4g. Des paliers des valeurs nulles sont aussi constatés avec un pas d'échantionnage de 1ms.

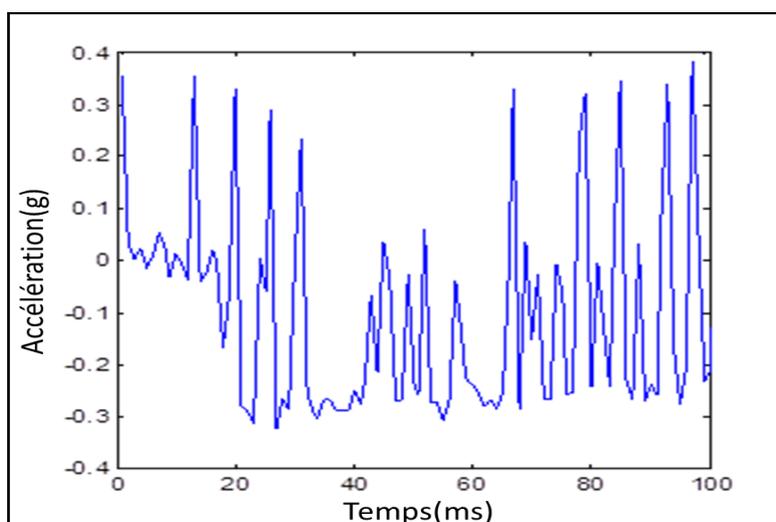


Figure 4.13 Evolution de l'accélération au cours du temps pour une vitesse de 27rad/s

Comme nous l'avons signalé précédemment, les phénomènes de réflexion et de diffusion produisent des évanouissements au niveau du signal émis. Retournons, au cas du système étudié où l'antenne est entraînée en rotation, ce qui conduit à des successions de maxima et de minima, ces phénomènes provoquent des évanouissements rapides. Un comparatif entre les signaux filaire et sans fils permet d'illustrer leur impact sur la qualité du signal et sur son affaiblissement (voir figure 4.14).

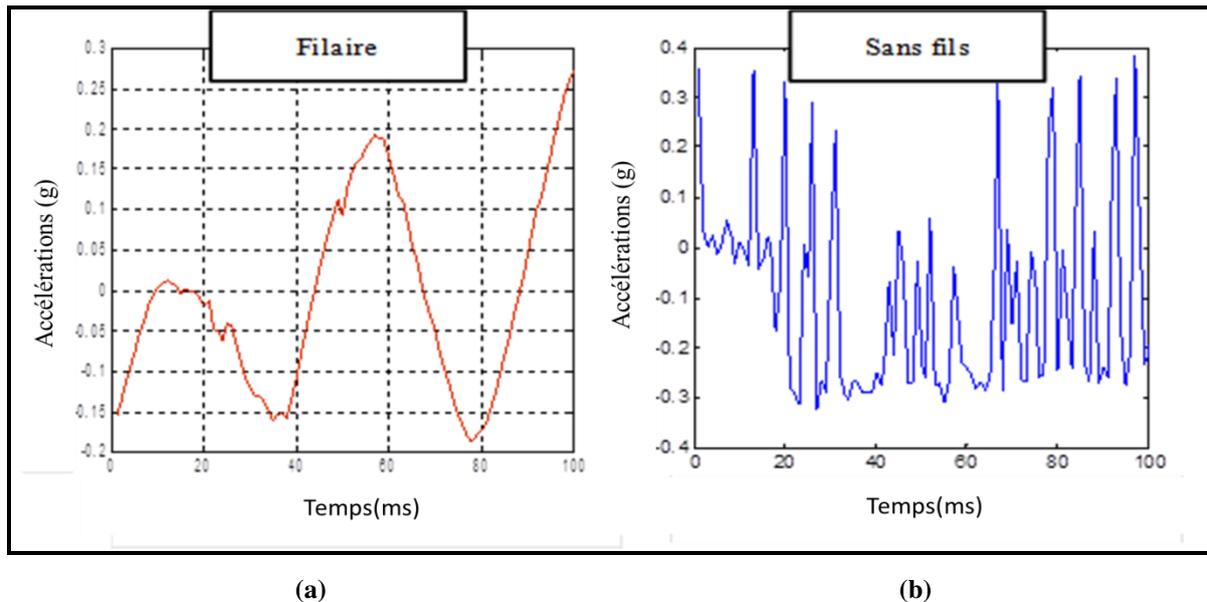


Figure 4. 14 Evolution des signaux filaires vs sans fils

La nature de la communication affecte considérablement la qualité du signal et cela est bien souligné en comparant deux évolutions des signaux pour une même vitesse de rotation et pour cas de communications filaire et sans fils.

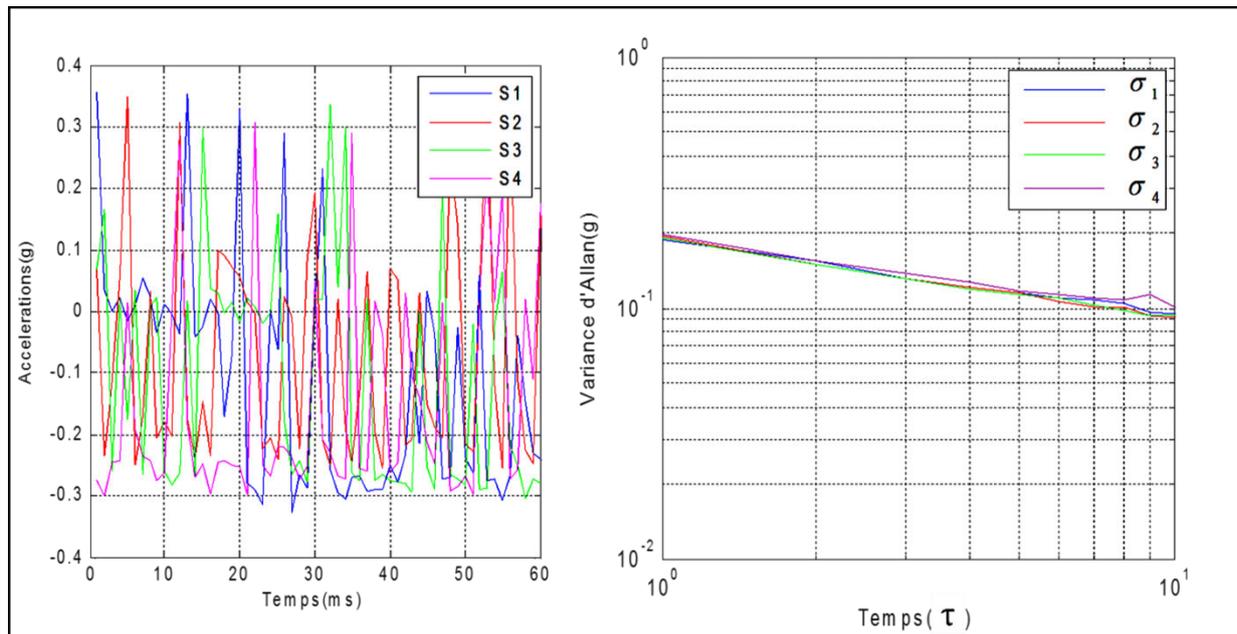
4.7. EVOLUTION DE LA VARIANCE D'ALLAN RELATIVE AUX ACCELERATIONS SANS FILS VIS-A-VIS DE LA VITESSE DE ROTATION DU MOTEUR

Au niveau de cette partie, nous procédons à vérifier la relation de corrélation existante entre la vitesse de rotation de la MCC et la Variance d'Allan correspondant aux signaux sans fils pour des multiples cas.

4.7.1. Variance d'Allan à vitesse constante

Des tests multiples ont été menés pour une vitesse de 27 rad/s, ainsi la figure 4.15.a représente l'évolution des accélérations relatives à cet état de rotation qui décrivent des évolutions temporelles différentes. Cependant, ces mêmes signaux

présentent des évolutions similaires selon le critère de la variance d'Allan (voir figure 4.15.b).



(a)

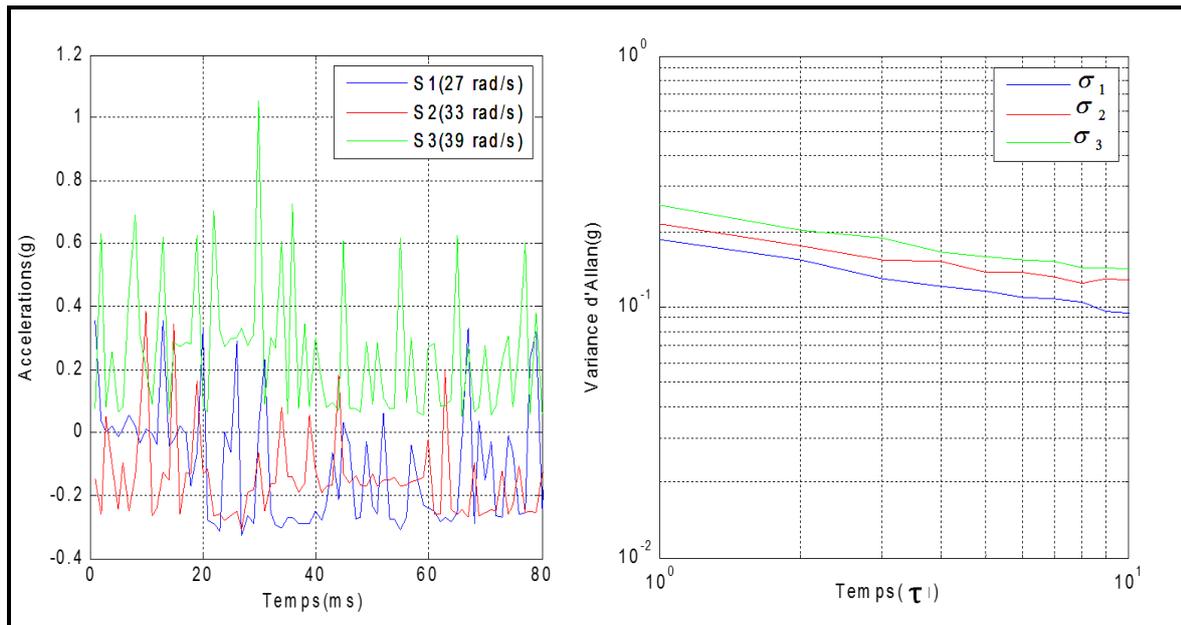
(b)

Figure 4. 15.a. Evolution des signaux pour une vitesse de 27 rad/s. b. Evolution des variances d'Allan relatives aux signaux ayant comme vitesse 27 rad/s.

Selon les résultats trouvés, il est constaté que la variance d'Allan présente un bon indicateur de la vitesse de rotation du moteur malgré l'état bruité des signaux utilisés.

4.7.2. Evolution de la variance d'Allan pour des multiples valeurs de vitesse

Pour bien explorer la corrélation existante entre la variance d'Allan et la vitesse de rotation, nous procédons dans la suite à une détermination de cette variance pour des signaux d'accélération correspondants à des différentes valeurs de vitesses. Le suivi d'évolution temporelle de ces signaux ainsi que les variances d'Allan correspondantes sont illustrés sur la figure 4.16. Nous soulignons que S₁, S₂, S₃ représentent les accélérations respective à des vitesses 27rad/s, 33rad/s et 39rad/s.



(a)

(b)

Figure 4.16. (a). Evolution temporelle de signaux ayant des valeurs de vitesse différentes (27rad/s, 33rad/s, 39rad/s), (b). Evolution de la variance d'Allan relative aux signaux pour des valeurs de vitesse différentes (27rad/s, 33rad/s, 39rad/s),

La figure 4.16. (a) montre que la variance d'Allan augmente proportionnellement à la vitesse de rotation. On constate également, une corrélation entre la vitesse de rotation et la variance d'Allan correspondante est bien constatée.

4.8. DETERMINATION DE LA VITESSE DE ROTATION D'UNE MCC A BASE DES CAPTEURS SANS FILS

L'approche de détermination de la vitesse à base de la Variance d'Allan, testée au niveau filaire, est appliquée dans la suite pour les signaux sans fils. Cette approche consiste à calculer l'écart entre deux variances d'Allan relatives à deux valeurs connues de vitesses de rotation par exemple (σ_1 relative à Ω_1 et σ_2 relative à Ω_2). Ainsi, une relation entre l'écart entre les variances ($\sigma_2 - \sigma_1$) et l'écart de vitesse ($\Omega_2 - \Omega_1$) peut être élaborée. Dans ce cas, un écart de 0.024g correspond à 6 rad/s, c'est-à-dire une vitesse de 1 rad/s correspond à un écart de 0.0034g selon la variance d'Allan (cf. 5.17). Une fois cet écart est déterminé. L'estimation de la vitesse relative à n'importe quel signal d'accélération est possible.

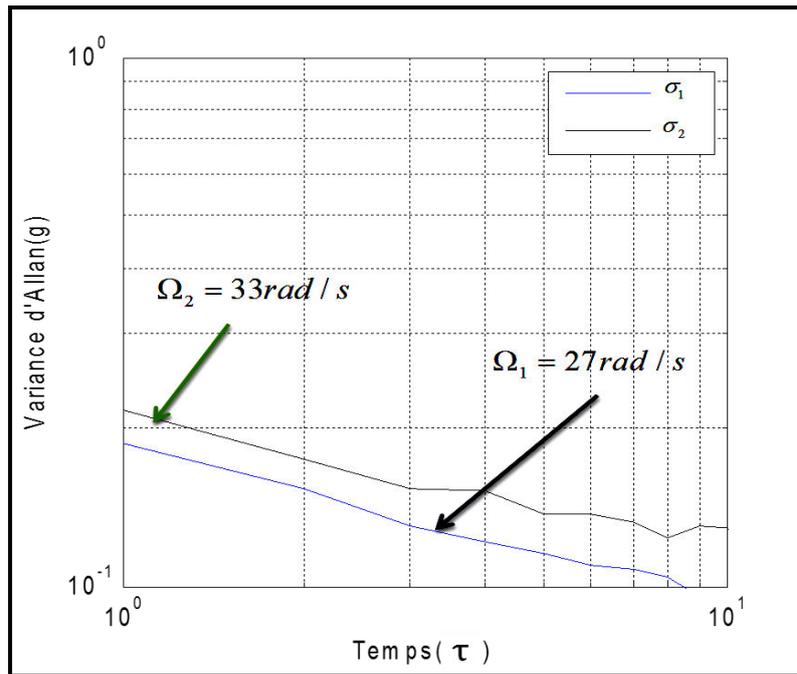


Figure 4. 17 Evolution de la variance d'Allan pour des acquisitions obtenues avec différentes valeurs de vitesse

La méthodologie de la détermination adoptée peut se résumer en trois étapes essentielles qui sont les suivantes

- ✓ Le calcul de la Variance d'Allan (VA) relative au signal d'accélération dont on souhaite déterminer sa vitesse
- ✓ L'estimation de l'écart entre la VA et VA de référence. En effet, une variance, dont on connaît la vitesse qu'elle représente, est choisie comme référence. Au niveau de l'exemple illustré dans la suite σ_1 est pris comme étant référence (corresponde de 27 rad/s en vitesse).
- ✓ Calcul de la vitesse.

Un exemple est illustré sur la figure 4.18 la variance d'Allan σ_3 relative à un signal S_3 , dont on souhaite déterminer la vitesse correspondante. L'écart entre σ_3 et σ_1 (VA de référence) est estimé à 0.0479g (1rad/s correspond à un 0.0034g) ce qui correspond à une variation de 11.139rad/s. Donc, la valeur de vitesse Ω_3 estimée dans ce cas correspond à la somme de la vitesse Ω_1 (prise comme référence) et la vitesse correspond à l'écart entre les deux variances d'Allan (11.39rad/s) ce qui permet d'avoir les résultats suivants $\Omega_3 = 27 + 11.39 = 38.4rad/s$. Une comparaison entre la valeur déterminée (38.4 rad/s) avec celle trouvée avec mesure

tachymétrique de 5% de précision (39rad/s) ce qui permet d'avoir une erreur de 1.54%.

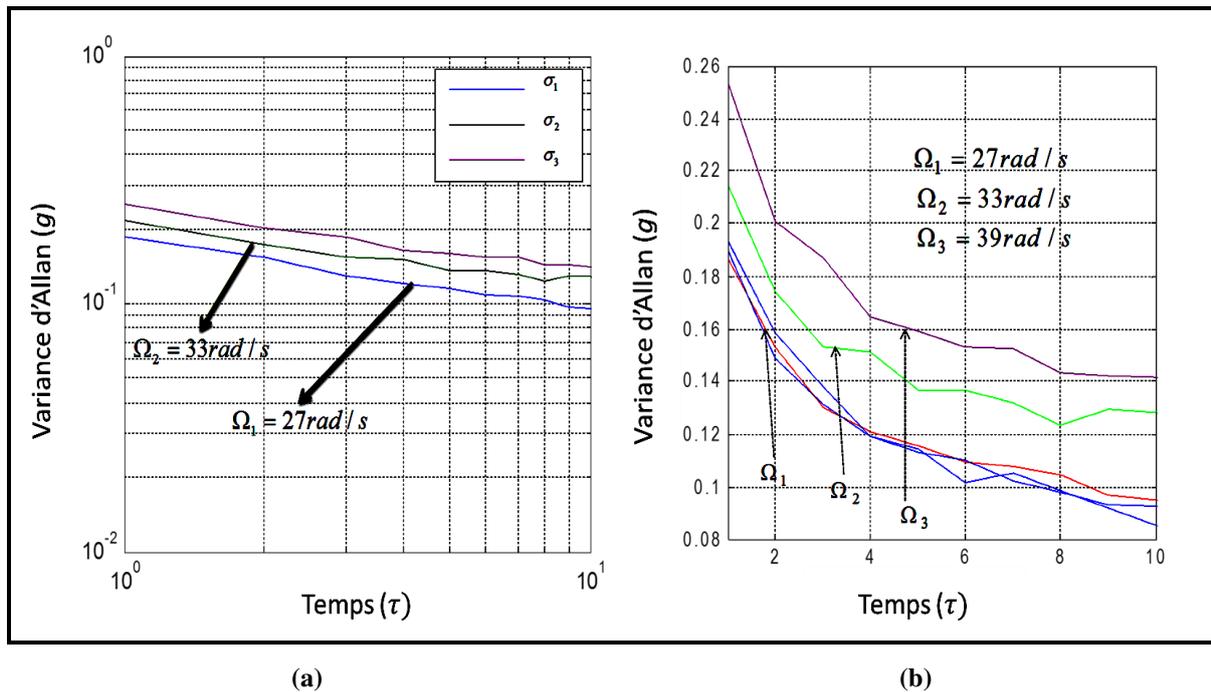


Figure 4. 18. Détermination de la variance d'Allan relative à Ω_3

Au cours de cette partie, une nouvelle approche de détermination de la vitesse à partir des signaux des accéléromètres a été développée. Un appel à une telle approche a été effectuée vu la nature dégradée des signaux récupérés. Afin d'améliorer la qualité des signaux, un appel à un signal d'accélération de référence est envisagé dans la suite. La méthode de reconstruction proposée est détaillée au niveau de ce chapitre. Il est noté que le signal reconstruit est utilisé pour améliorer la qualité des signaux issus des accéléromètres MEMS et pour substituer le signal en cas d'une perte totale ou d'un affaiblissement important.

D'autres applications peuvent être envisagées pour l'utilisation de ce signal de référence. Ainsi, il peut être utilisé pour estimer le taux de perte des paquets transmis.

4.9. RECONSTRUCTION DU SIGNAL D'ACCELERATION DE REFERENCE

Dans le système de contrôle et de surveillance à distance sans fils, la qualité de la communication est liée principalement au canal de propagation radio fréquence reliant l'émetteur et le récepteur. Les évanouissements angulaires, dus aux multitudes des trajets d'une part et à la rotation de l'émetteur d'autre part,

engendrent des fluctuations de puissance et affectent considérablement la qualité du signal transmis. Au cours de ce travail, une approche systématique originale a été proposée. Cette dernière est basée essentiellement sur la reconstruction d'un signal de référence représentant une évolution à priori d'accélération. L'approche de reconstruction a été déjà abordée et testée dans le cas filaire (voir Chapitre 3) et elle est appliquée dans la suite pour les signaux sans fils.

L'approche est basée essentiellement sur deux étapes fondamentales, une première « OFF ligne » pendant laquelle la collection des signaux expérimentaux relatifs à une même vitesse est réalisée. Ces signaux sont utilisés pour l'élaboration d'une base de données qui est utilisé pour l'extraction des critères de performances relatifs à un certain état de rotation (voir figure 4.19). Ensuite ; les critères déterminés sont utilisés au niveau d'un algorithme à base des AG pour définir le signal de référence. Enfin, tous les résultats trouvés (relatifs à chaque vitesse) sont collectés pour les utiliser dans une tâche de traitement « ON ligne ».

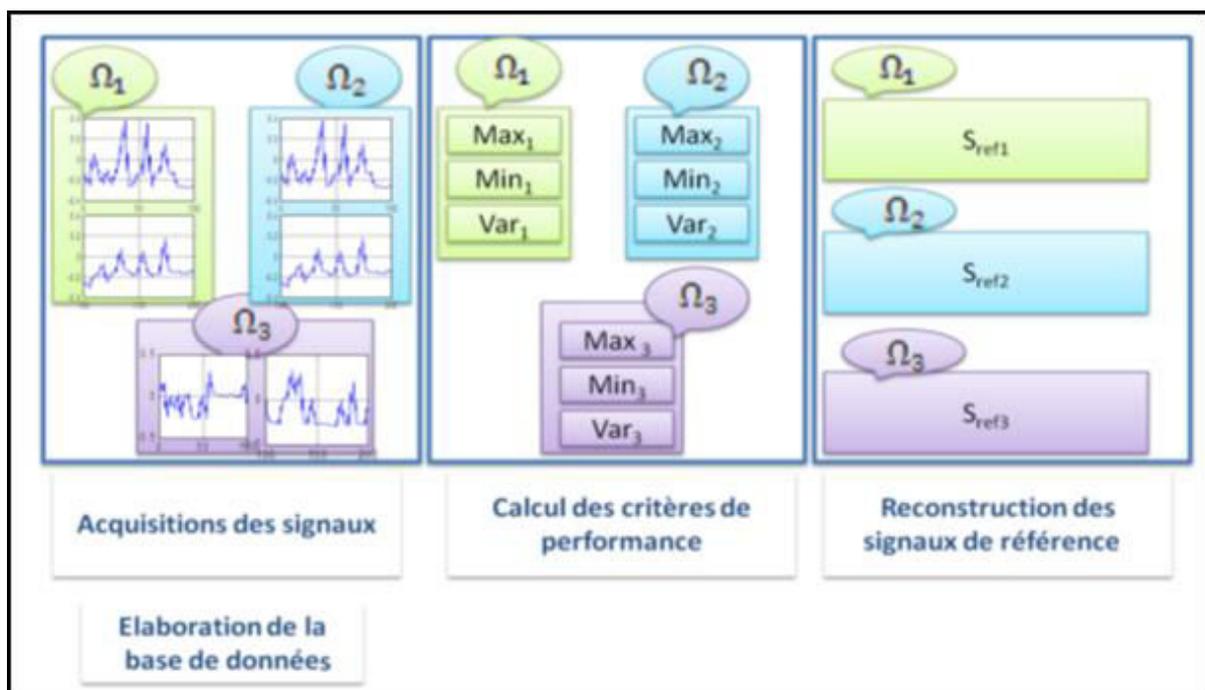


Figure 4. 19. Méthodologie proposée pour l'élaboration d'une base de données

Pareillement au cas filaire le signal est reconstruit à base des motifs sinusoïdaux et en utilisant certains critères calculés à partir d'une base de données (un nombre d'acquisitions expérimentales prises pour une même vitesse angulaire) (voir figure 4.20).

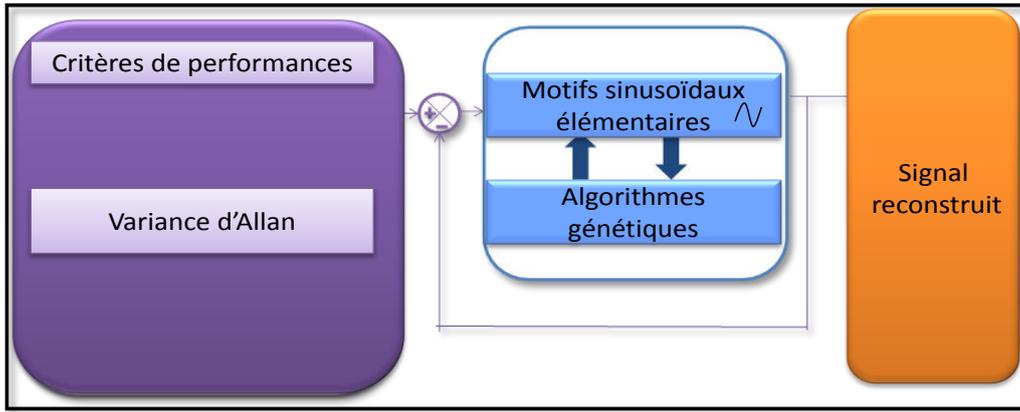


Figure 4. 20. Méthodologie de reconstruction basée sur les critères de performances adoptée aux signaux sans fils

4.9.1. Choix des critères de performances

Afin de faire un choix convenable pour les critères qui sont retenus pour la suite, et qui reflètent le mieux l'information d'accélération et de vitesse un suivi a été effectué sur certains qui ont été calculés pour différentes vitesses de rotation à savoir la variance d'Allan) et la densité de répartition statistique qui sont représentés respectivement sur les figures 4.21 et 4.22.

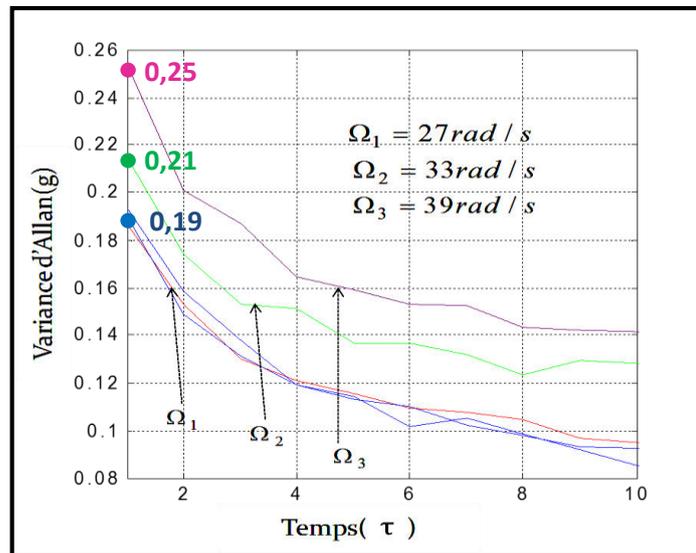


Figure 4. 21. Evolution de la variance d'Allan en fonction du temps, paramétrée en vitesse

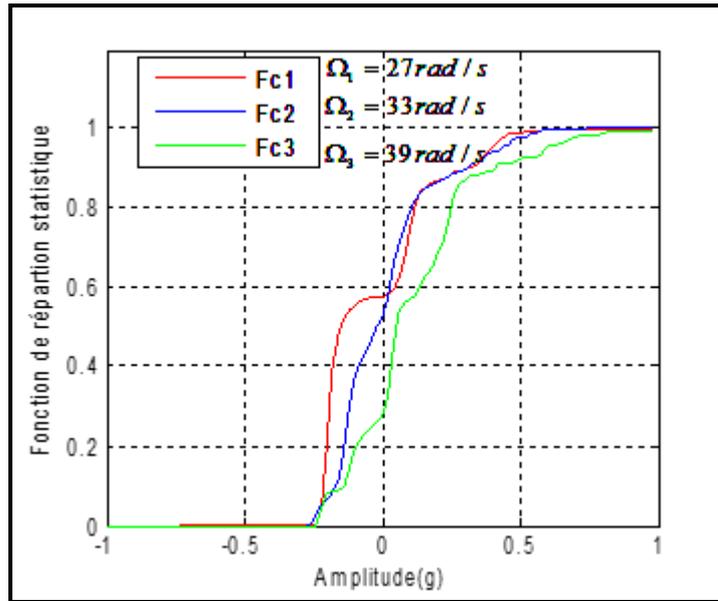


Figure 4. 22. Evolution de la fonction de répartition statistique en fonction de temps, paramétrée en vitesse

Les différentes valeurs maximales et minimales déterminées sont illustrées sur la table 4.3

Table 4. 3 Evolution des valeurs maximales des accélérations en fonction de la vitesse

Vitesse	27rad/s	33rad/s	39rad/s
Accélération maximale	0.5	0.5545	0.8466
Accélération minimale	-0.30	-0.1785	-0.1687

Dans le cas de la communication sans fils le signal est plus affecté par les perturbations qui dégradent sa qualité ce qui nécessite un choix judicieux des critères de performances. Ainsi, au niveau de cette partie un choix a été porté sur la variance d'Allan moyenne (déterminée à partir des acquisitions prises pour un même état de rotation) et le signal moyen (moyenne d'un nombre d'acquisitions).

4.9.2. Reconstruction d'accélération d'une vitesse 27rad/s

Au niveau de la partie filaire un seul motif élémentaire était suffisant pour reconstruire le signal dit de référence. Dans le cas sans fils où les pertes et les perturbations sont plus importantes un nombre minimal de trois harmoniques est nécessaire. L'évolution temporelle du signal d'accélération réel et celui du signal

reconstruit par la méthode ainsi détaillée est illustrée sur la figure 4.23 où une forte corrélation entre le signal réel et celui reconstruit a été bien constatée.

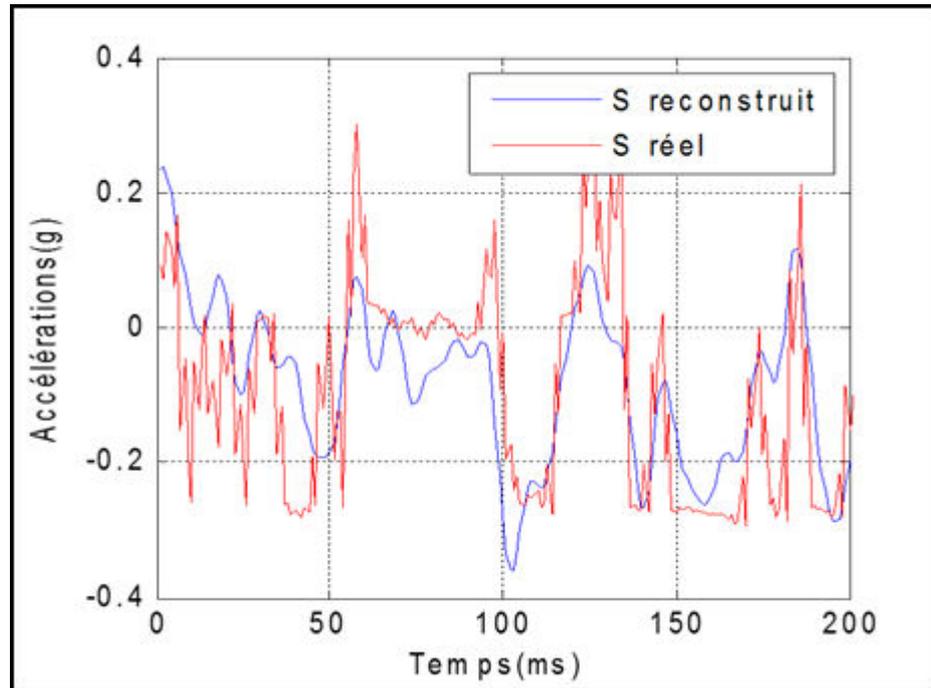


Figure 4. 23 Evolution des accélérations reconstruites et réelles

Pour souligner la convergence de l'algorithme de reconstruction proposé une représentation de l'évolution de la variance d'Allan relative au signal réel et au signal reconstruit par AG est représentée sur la figure 4.24

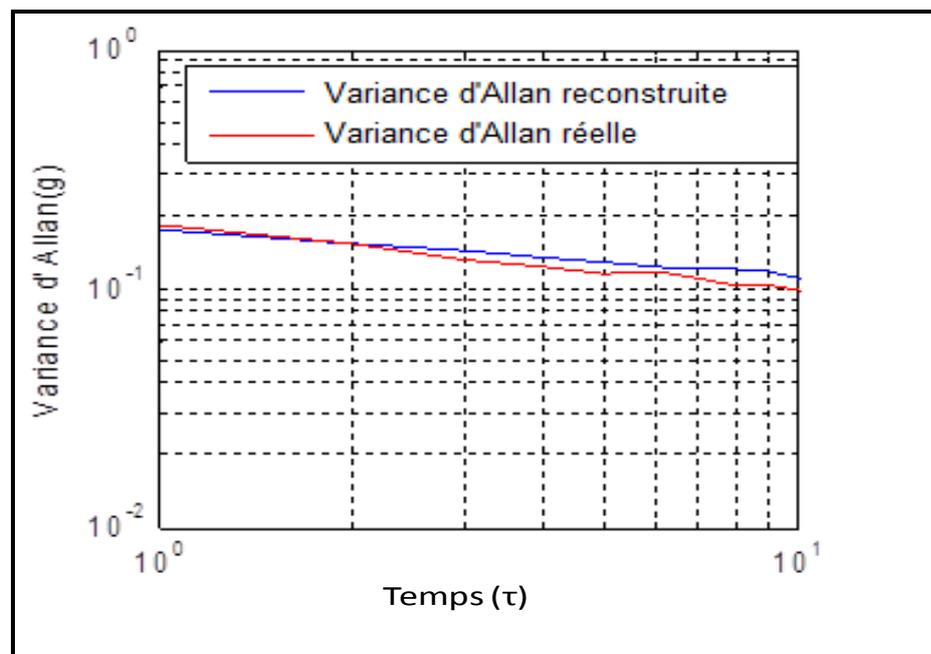


Figure 4. 24 Evolution de la variance d'Allan relative au signal réel et celui reconstruit

Le signal reconstruit décrit la même variation du critère de la variance d'Allan que celle du signal réel. Ainsi les résultats d'identification correspondants aux caractéristiques des trois harmoniques composant le signal sont donnés sur le tableau 4.4

Table 4. 4 Résultats d'identification pour une vitesse de 27 rad/s

Ω (rad/s)	A_1 (g)	φ_1 (rad)	f_1 (Hz)	A_2 (g)	φ_2 (rad)	f_2 (Hz)	A_3 (g)	φ_3 (rad)	f_3 (Hz)
27	0.028	0.906	0.896	0.075	0.369	42.94	0.054	0.585	3.050

Dans cette partie, l'approche de reconstruction proposée dans le cas des signaux filaires a été appliquée pour ceux sans fils. En effet, cette approche est basée sur l'utilisation des critères de performances calculés à partir d'une base de données expérimentale. L'algorithme de reconstruction développé, basé sur les algorithmes génétiques, permet de définir un signal de référence pour chaque vitesse en fonction d'un nombre choisi des motifs sinusoïdaux et selon trois critères principaux qui sont la phase, l'amplitude, et la fréquence. Ainsi, la connaissance de ces critères permet de générer ces signaux automatiquement. La procédure de reconstruction a été effectuée pour de multiples cas présentant des valeurs de vitesse multiples ce qui permet de définir un catalogue des signaux de référence. Les signaux de référence serviront à améliorer les signaux récupérés dans le cas d'une perte ou d'un évanouissement.

4.9.3. Reconstruction d'accélération d'une vitesse de 33 rad/s

Pareillement au cas précédent un signal de référence correspondant à une vitesse de 33rad/s est défini. Ainsi les différentes caractéristiques de ces signaux sont illustrées dans tableau 4.5

Table 4. 5 Résultats d'identification pour une vitesse de 33 rad/s

Ω (rad/s)	A_1 (g)	φ_1 (rad)	f_1 (Hz)	A_2 (g)	φ_2 (rad)	f_2 (Hz)	A_3 (g)	φ_3 (rad)	f_3 (Hz)
33	0.116	0.017	5.998	0.047	0.0073	0.5183	0.091	0.0196	91.99

4.9.4. Reconstruction d'accélération d'une vitesse de 39 rad/s

La dernière valeur de vitesse a été prise à 39 rad/s. Ainsi les résultats trouvés dans ce cas sont illustrés sur le tableau 4.6

Table 4. 6 Résultats d'identification pour une vitesse de 39 rad/s

Ω (rad/s)	A_1 (g)	φ_1 (rad)	f_1 (Hz)	A_2 (g)	φ_2 (rad)	f_2 (Hz)	A_3 (g)	φ_3 (rad)	f_3 (Hz)
39	0.4759	2.354	5.0007	0.0738	0.0984	3.348	0.067	2.29	49.47

4.9.5. Génération des signaux de références

Un récapitulatif des résultats de reconstruction trouvés pour les trois vitesses signaux de référence a été achevé au niveau de cette partie, ainsi les résultats trouvés sont illustrés au niveau du tableau

Table 4. 7 Résultats d'identification pour les différentes vitesses

Ω (rad/s)	A_1 (g)	φ_1 (rad)	f_1 (Hz)	A_2 (g)	φ_2 (rad)	f_2 (Hz)	A_3 (g)	φ_3 (rad)	f_3 (Hz)
27rad/s	0.028	0.906	0.896	0.075	0.369	42.94	0.054	0.585	3.050
33rad/s	0.116	0.017	5.998	0.047	0.0073	0.5183	0.091	0.0196	91.99
39rad/s	0.475	2.354	5.0007	0.0738	0.0984	3.348	0.067	2.29	49.47

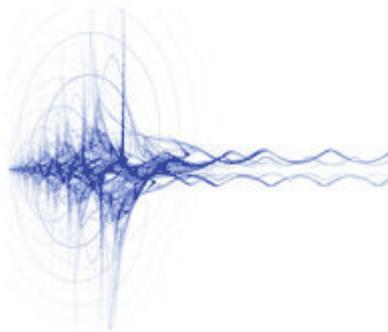
Une génération automatique à base de réseaux de neurones peut être proposée comme perspectives, ainsi pour chaque valeur de vitesse un signal de référence est généré

4.10. CONCLUSION

Les différents tests réalisés au niveau de cette étude ont souligné la fiabilité du dispositif proposé. Des algorithmes de reconstruction des signaux d'accélération de référence ont été proposés pour une amélioration en cas de dégradation intense d'une part et afin de garantir l'émission même dans le cas d'une perte momentanée totale. Ainsi, l'objectif principal de cette étude consiste à proposer une architecture, simple, fiable, à faible coût, peu encombrante et pouvant être autonome d'un capteur sans fils intelligent à base des accéléromètres en technologie MEMS. La simplicité et la taille de notre dispositif permettent aux fabricants des machines d'envisager facilement son intégration dans leurs produits.

Afin de souligner la fiabilité du dispositif nous proposons dans la suite de ce mémoire de placer sur un autre type de machine ayant des caractéristiques assez différentes du point de vue structure et puissance à savoir la machine asynchrone.

CHAPITRE 5 : DÉTECTION DES VIBRATIONS DU ROTOR D'UN ACTIONNEUR TOURNANT



Résumé

Au niveau de ce chapitre, nous allons tester la fiabilité du dispositif sans fils proposé pour le contrôle d'une machine asynchrone de 1.5Kw de puissance. De plus, le nœud capteur proposé est utilisé pour la surveillance des vibrations dans les machines tournantes. Les signatures de vibration sont généralement relatives à un état de dégradation du moteur et leur suivi est primordial pour enclencher, si nécessaire, une procédure de maintenance.

Au niveau de ce chapitre, un banc de test a été conçu et le suivi des signaux relatifs aux vibrations à partir des signaux d'accélération sans fils récupérés a été effectué. Le dispositif sans fils proposé a été évalué pour des multiples valeurs de vibrations et durant différents états de rotation. Ensuite, afin de concrétiser les résultats trouvés et les rendre les plus proches possible de l'utilisateur une Interface Homme Machine (IHM) a été mise en place.

Sommaire

5.1. INTRODUCTION.....	125
5.2. FAISABILITE D'UN AUTOPILOTAGE DE LA MACHINE ASYNCHRONE PAR CAPTEUR MEMS SANS FILS	125
5.2.1. CORRELATION ENTRE LA VITESSE ET LA VARIANCE D'ALLAN	127
5.2.1.1. Vitesse fixe	127
5.2.1.2. Vitesse variable	128
5.2.2. EFFET DES EMBLEMES DES CAPTEURS SUR LA QUALITE DU SIGNAL TRANSMIS	131
5.2.2.1. Cas 1 : capteur placé à une distance D1 par rapport à l'axe de rotation ..	131
5.2.2.2. Cas 2 : capteur placé à une distance D2 par rapport à l'axe de rotation ...	132
5.2.2.3. Comparaison	133
5.2.3. EFFET DE LA PRESENCE DU CAPOT SUR LA QUALITE DE TRANSMISSION	133
5.3. INTERET DE LA SURVEILLANCE DES VIBRATIONS.....	135
5.4. LIMITES DES SOLUTIONS FILAIRES EXSISTANTES	135
5.5. SURVEILLANCE SANS FILS DES VIBRATIONS.....	136

5.5.1. EFFET DES VIBRATIONS SUR L'EVOLUTION TEMPORELLE ET SPECTRALE DU SIGNAL D'ACCELERATION	137
5.5.2. EFFET D'INJECTION DES VIBRATIONS SUR L'ACCELERATION.....	138
5.5.3. VARIATION DES AMPLITUDES DES VIBRATIONS INJECTEES	142
5.5.4. REPONSE DES CAPTEURS SUITE A UNE VARIATION DE LA VITESSE DE ROTATION ET UNE INJECTION DES VIBRATIONS	143
5.6. DEVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE HOMME MACHINE POUR LE SUIVI DES SIGNAUX DE VIBRATIONS.....	145
5.6.1. INITIALISATION DES PORTS	146
5.6.2. RECUPERATION DES DONNEES	147
5.6.3. FERMETURE DE LA CONNEXION.....	147
5.6.4. VISUALISATION DES RESULTATS	147
5.7. CONCLUSION	148

5.1. INTRODUCTION

L'analyse vibratoire est un des outils les plus efficaces pour la surveillance et le diagnostic des actionneurs tournants. Ainsi, les vibrations présentes dans les machines électriques tournantes sont généralement liées à un état de dysfonctionnement du dispositif ou à l'occurrence d'un défaut pouvant être de nature mécanique (déséquilibre, désalignement, résonance,..) ou électriques.

L'efficacité d'une telle analyse dépend essentiellement du choix des capteurs pour assurer cette tâche. Grâce aux avantages qu'ils offrent par rapport aux capteurs de vibrations traditionnels comme leurs facilités d'intégration au niveau de l'axe de rotation et leurs faibles consommations énergétiques, les accéléromètres en technologie MEMS sont devenus récemment des méthodes alternatives pour la mesure et le contrôle de vibrations dans les machines électriques tournantes. Dans ce contexte, des études ont été menées nous pouvons citer celles de [SUB 14], [VIN 13] et [MAR 05].

Au niveau de ce chapitre, une stratégie sans fils de suivi des signatures de vibrations a été proposée. Un banc expérimental a été mis en place et une Interface Homme Machine a été développée sur LABVIEW. Le nœud capteur développé a été déjà mis en place sur une machine à courant continu, pour souligner sa fiabilité, sur n'importe quelle machine, il est implanté sur un autre type de machine à savoir celle asynchrone.

Ainsi le présent chapitre est organisé comme suit. Au début, nous proposons de placer notre smart capteur sur une machine asynchrone. Ensuite, nous présentons la stratégie de surveillance de vibrations proposée. Les différents dispositifs matériels et logiciels mis en place sont détaillés et l'apport d'une telle solution par rapport à celles filaires existantes est bien souligné.

5.2. FAISABILITE D'UN AUTOPILOTAGE DE LA MACHINE ASYNCHRONE PAR CAPTEUR MEMS SANS FILS

La partie suivante est consacrée à l'étude d'une machine asynchrone de puissance (1.5Kw) [Annexe A]. En effet, après avoir développé le concept de détermination de la vitesse pour une MCC, l'approche proposée est appliquée pour

un autre type de machine ayant des caractéristiques assez différentes à savoir la machine asynchrone (MAS). Grâce aux avantages que ce type de machine présente, elle est devenue la plus utilisée dans les systèmes d'entraînement. La MAS présente des caractéristiques différentes par rapport à celle à courant continu au point de vue structure. Une première tâche d'identification des paramètres électriques et mécaniques de cette machine a été achevée par algorithme génétique et qui est détaillé au niveau de l'Annexe (A). Les résultats trouvés sont illustrés au niveau du tableau 5.1

Table 5. 1 Paramètres relatifs à la MAS

Paramètres	Rr (Ω)	Rs(Ω)	Lr(H)	Lf(H)	J(m2kg)	f (m2kg/s)
Résultats par AG	2.233	5.509	0.205	0.143	0.0047	0.0018

Les caractéristiques relatives à la MAS en tant que structure, fabrication et puissance peuvent être la source d'autre type de perturbation affectant la communication entre l'émetteur et récepteur. Ainsi l'intérêt de cette partie consiste à tester la validité de la méthode proposée pour les signaux issus des accéléromètres en technologie MEMS appliquée pour une MAS. Les tests achevés par la suite permettent de prouver la fiabilité de la méthodologie de détermination proposée.

Le banc de test expérimental développé au niveau de cette partie est illustré sur la figure 5.1. Il est composé essentiellement d'une machine asynchrone alimentée par un variateur de vitesse (pour faire tourner le moteur à vitesse variable), des nœuds capteurs placés autour de l'arbre en rotation, un PC pour la récupération des signaux et un point d'accès WiFi (norme 802.11).

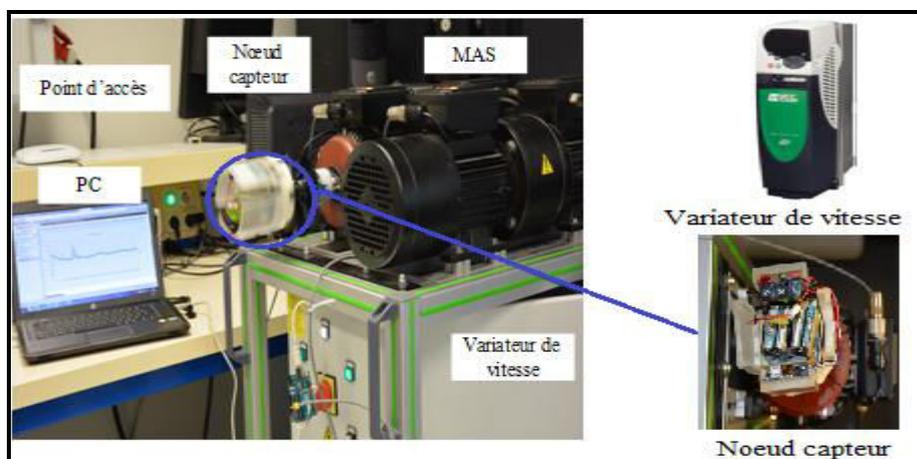


Figure 5. 1 Banc expérimental à base d'une MAS sans capot

5.2.1. Corrélation entre la vitesse et la variance d'Allan

5.2.1.1. Vitesse fixe

La MAS est entraînée à une vitesse constante estimée à 16.33 rad/s. Une configuration automatique du variateur de vitesse à cette valeur est effectuée. En effet, grâce à sa structure interne, le variateur de vitesse permet de faire tourner le moteur à une valeur de vitesse prédéfinie par l'utilisateur. Les détails de la structure du contrôle interne choisi de ce dispositif sont illustrés au niveau de [l'Annexe B]. Nous présentons sur la figure 5.2 l'évolution du signal d'accélération récupéré.

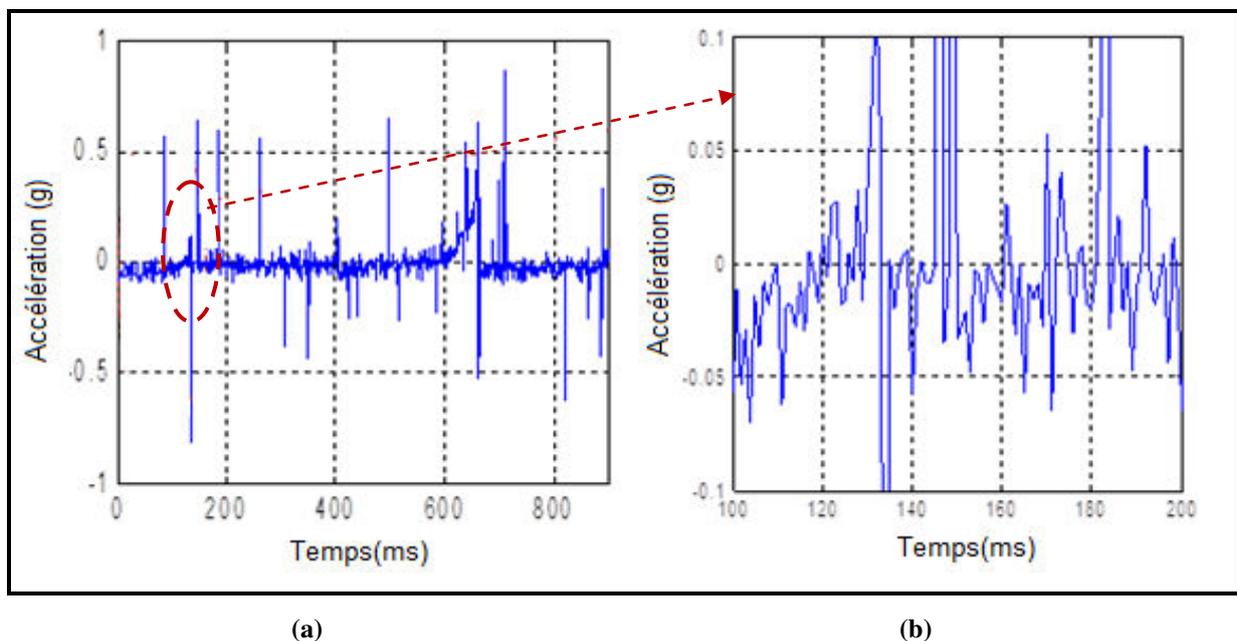


Figure 5. 2 Evolution du signal d'accélération. b. Zoom de l'évolution de l'accélération

Le signal d'accélération récupéré dans le cas d'une MAS présente des perturbations et des évanouissements plus importants en les comparant à ceux existants sur la machine DC et cela est dû à l'effet de la force électromagnétique interne, à la vitesse de rotation du moteur et à la puissance de la MAS utilisée par rapport à celle MCC. Une illustration d'évolution du critère d'Allan relative à cet état de rotation est présenté selon la figure 5.3.

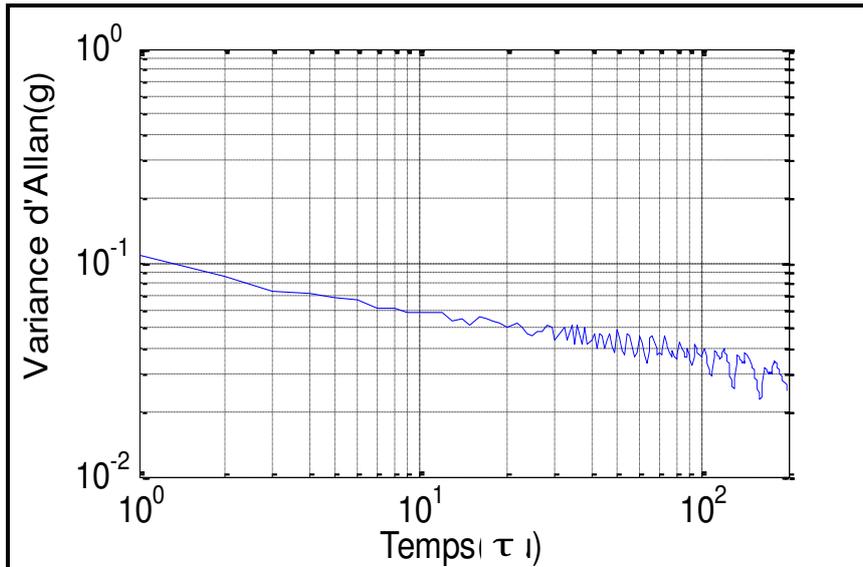


Figure 5. 3 Evolution de la variance d'Allan relative à un signal d'accélération pris dans le cas de la machine asynchrone

5.2.1.2. Vitesse variable

Nous procédons dans la suite à un fonctionnement à vitesse variable. Ainsi, comme nous l'avons signalé avant, la configuration utilisée au niveau du variateur de vitesse consiste à définir à l'entrée une valeur de référence de vitesse à laquelle le moteur va impérativement tourner. Pour la généralisation de ce cycle de vitesse un simple programme a été conçu sur arduino et qui est décrit selon la figure 5.4

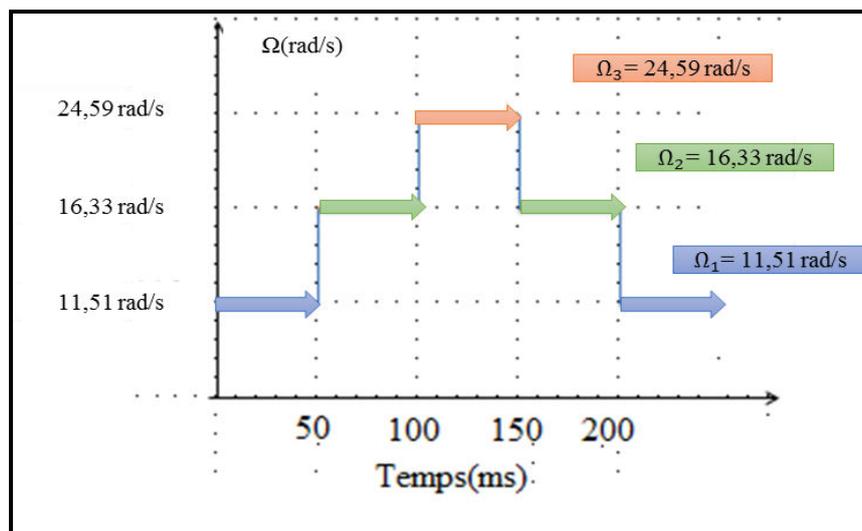


Figure 5. 4 Cycle de variation de vitesse programmé sur une carte arduino

Les signaux issus de l'accéléromètre récupérés pendant le cycle de fonctionnement présenté sur la figure 5.4, sont illustrés sur la figure 5.5. Il est

noté que ce signal présente pour chaque pas de 50ms un cycle de rotation différent. D'autre part, selon cette même figure, il est constaté que les évanouissements deviennent plus importants avec l'augmentation de la vitesse.

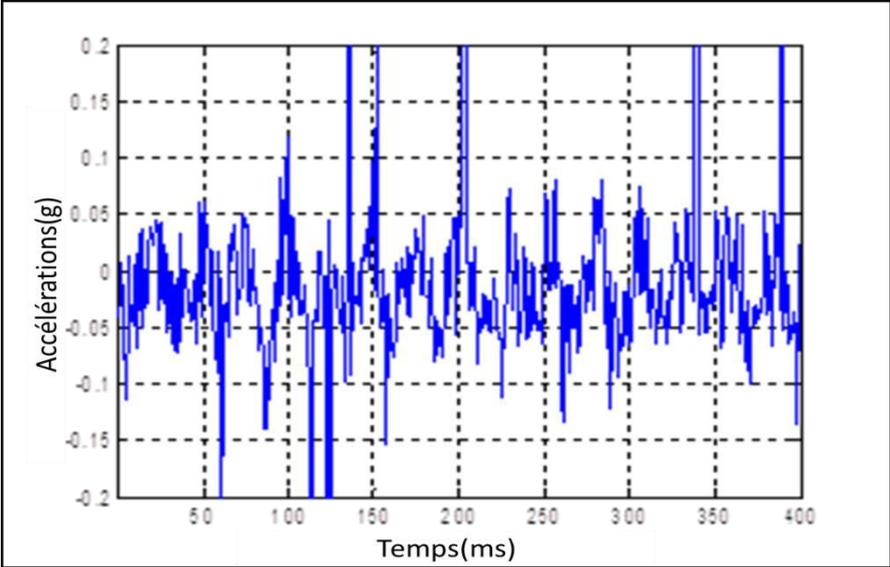


Figure 5. 5 Evolution des accélérations pour un cycle variable de vitesse

Ce changement de vitesse a été bien repéré au niveau de la représentation de variance d'Allan illustré sur la figure 5.6 par trois paliers reproduisant les zones d'évolution de la vitesse ($\Omega_1=11.51\text{rad/s}$, $\Omega_2=16.33\text{ rad/s}$, $\Omega_3= 24.6\text{ rad/s}$). Ainsi les résultats trouvés au niveau de cette figure illustrent la bonne corrélation entre la vitesse de rotation et la variance d'Allan calculée pour chaque cas.

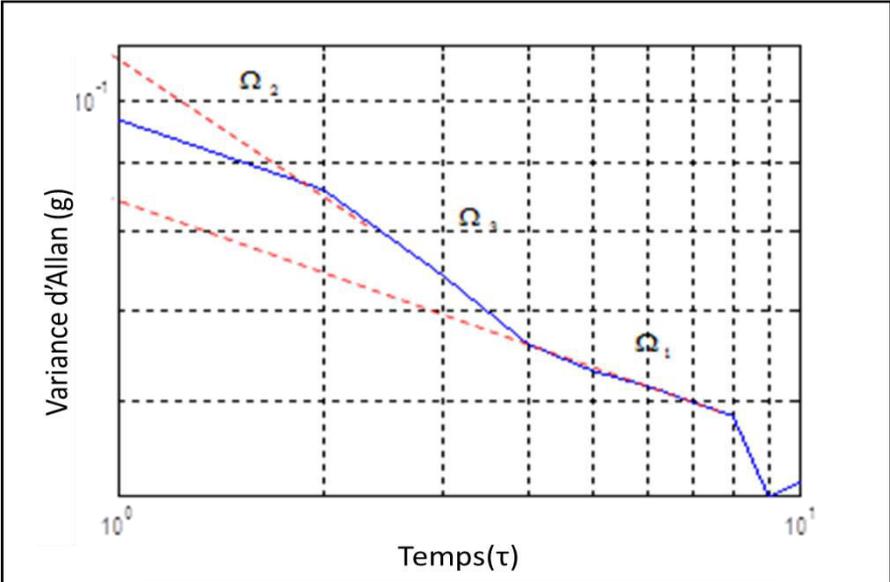


Figure 5. 6 Evolution de la variance d'Allan relative à un cycle variable de vitesse

Afin de repérer ces zones d'études, nous proposons d'effectuer des traitements par morceaux. Ainsi chaque partie correspondant à une certaine vitesse est traitée d'une manière séparée des autres.

Les figures 5.7.a et 5.7.b illustrent l'évolution des accélérations relatives respectivement aux vitesses Ω_1 et Ω_2 et Ω_1, Ω_2 et Ω_3 . Ils permettent de bien montrer l'impact de la rotation sur la qualité du signal transmis. Selon ces figures, il est clair que plus la vitesse augmente plus les pertes augmentent considérablement.

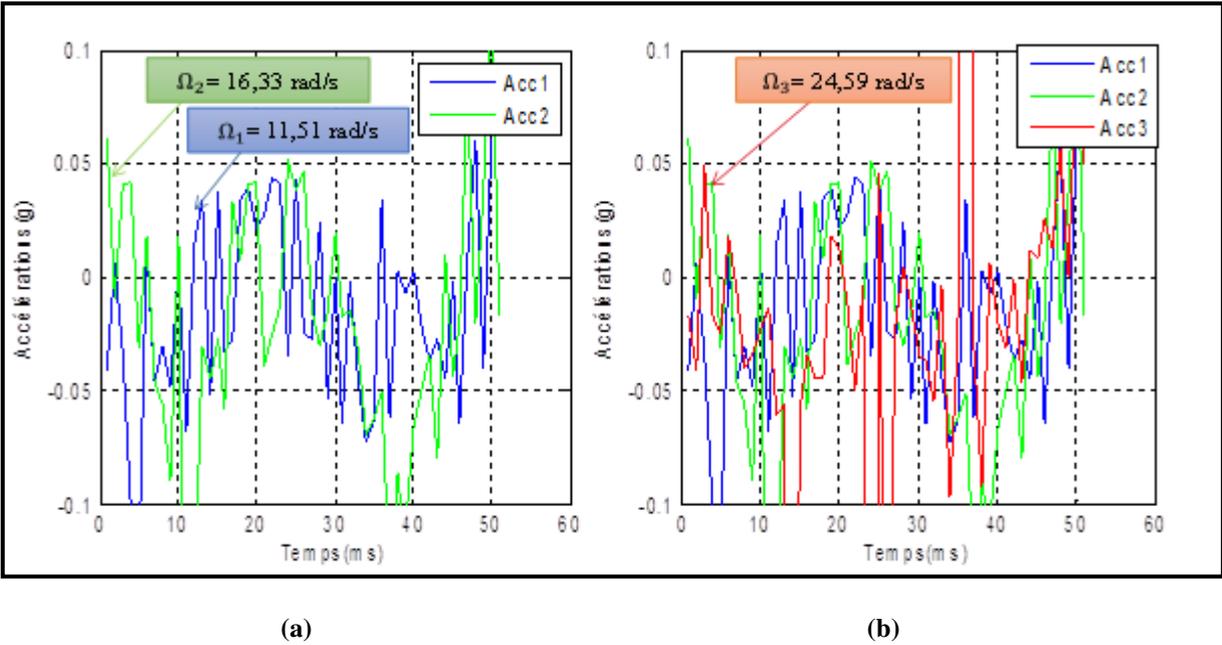


Figure 5. 7 Evolution des accélérations pour des valeurs de vitesses variables

Les variances d'Allan relatives à ces signaux sont représentées sur la figure 5.8. Ces trois variances repèrent les zones de variation de vitesses.

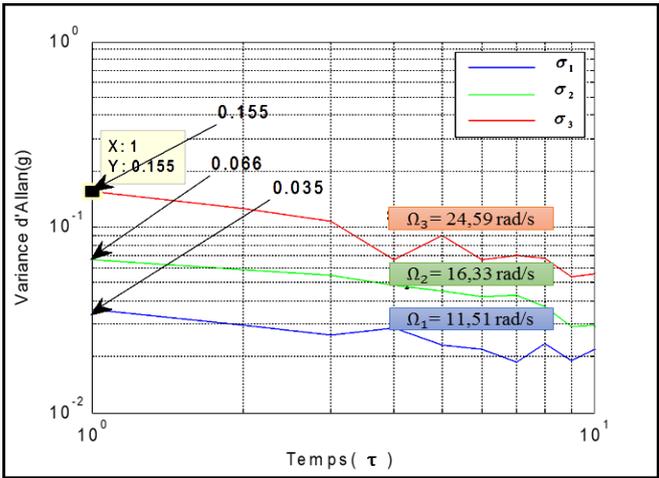


Figure 5. 8 Evolution de la variance d'Allan relativement à un cycle variable de vitesse

Une bonne corrélation entre la vitesse de rotation et la variance d'Allan pour deux cas de machine à savoir MAS et MCC a été bien soulignés. Cette corrélation est toujours valable pour des vitesses constantes ou variables.

Ainsi il est noté que le smart capteur proposé permet la connaissance de l'information de vitesse et le suivi de sa variation indépendamment de la nature d'actionneur utilisé.

D'autre part, pour une amélioration possible des résultats, il s'avère important de connaître l'emplacement adéquat de ces dispositifs de mesure par rapport à l'axe de rotation. C'est dans ce contexte que la suite de ces travaux se déroule.

5.2.2. Effet des emplacements des capteurs sur la qualité du signal transmis

L'accent a été mis au cours de cette partie sur l'impact de l'emplacement du capteur sur la qualité du signal émis. Un dispositif expérimental a été mis en place. Ce dernier est composé de deux capteurs placés à des emplacements différents par rapport à l'axe en rotation (voir figure 5.9). Ensuite, un suivi et un comparatif entre les deux signaux récupérés ont été effectués.

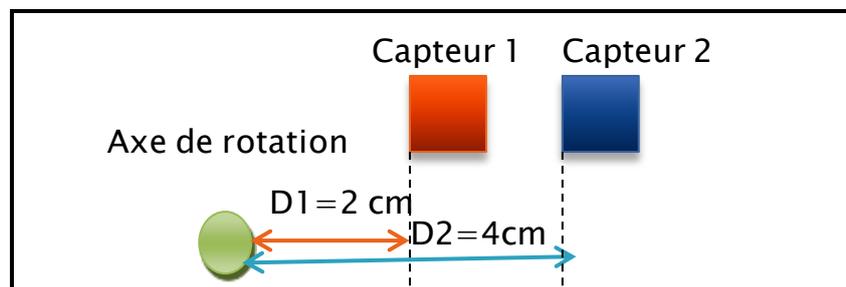


Figure 5. 9 Disposition des capteurs par rapport à l'axe de rotation

5.2.2.1. Cas 1 : capteur placé à une distance $D1$ par rapport à l'axe de rotation

Comme l'illustre la figure 5.9, Un premier capteur est placé à une distance $D1$ (2 cm, 2 cm) suivant l'axe x, y par rapport au centre de rotation. Les résultats trouvés dans ce cas sont illustrés au niveau de la figure 5.10. Les signaux présentés selon ces figures représentent les accélérations dans les deux axes A_x et A_y .

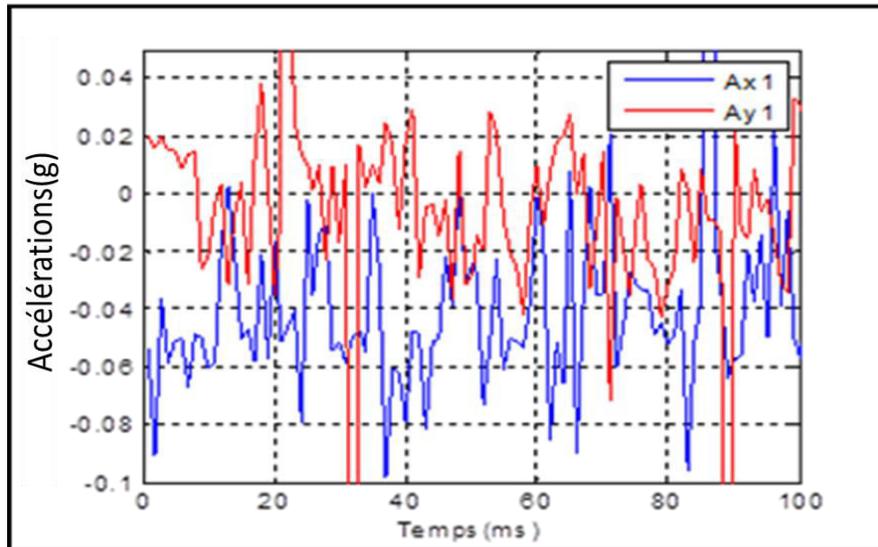


Figure 5.10 Evolution des signaux d'accélération pour une position D1 par rapport à l'axe de rotation

Les signaux d'accélération présentés suivent une évolution quasi sinusoïdale. Leurs natures bruitées se manifestent clairement au niveau de la phase et de l'amplitude (décalage). D'autre part, les deux composantes x et y du signal d'accélération ne sont pas en quadrature ce qui est dû essentiellement aux perturbations existantes.

5.2.2.2. Cas 2 : capteur placé à une distance D2 par rapport à l'axe de rotation

Un deuxième capteur ADXL203 est placé à une distance $D2 > D1$ par rapport à l'axe de rotation. Cette position est repérée selon les coordonnées suivantes (4cm, 2cm) par rapport aux deux axes x et y.

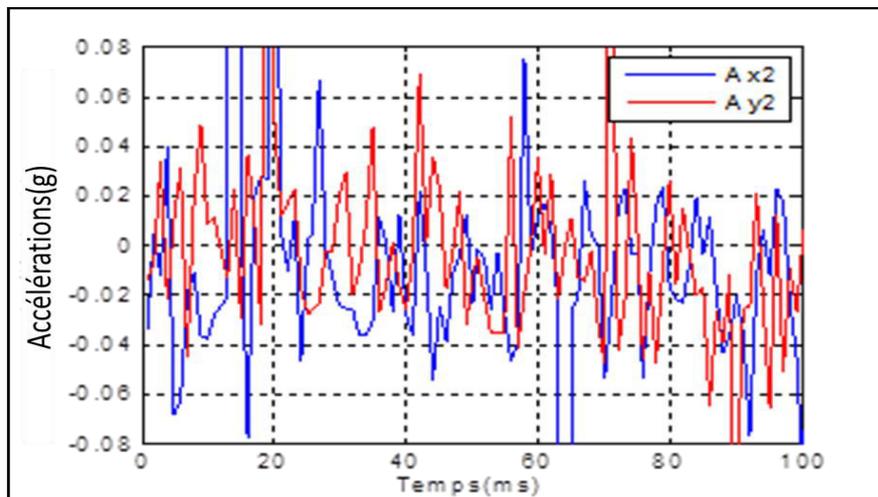


Figure 5.11 Evolution des signaux d'accélération pour une position D2 par rapport à l'axe de rotation

D'autre part, il est noté que l'accélération selon l'axe x est plus susceptible à l'évanouissement en la comparant que celle relative à l'axe y.

5.2.2.3. Comparaison

Afin de souligner l'impact de la distance par rapport à l'axe, les deux composantes d'accélération A_{x1} et A_{x2} relatives à un emplacement des capteurs selon la position D_1 et D_2 sont représentés au niveau de la figure 5.12

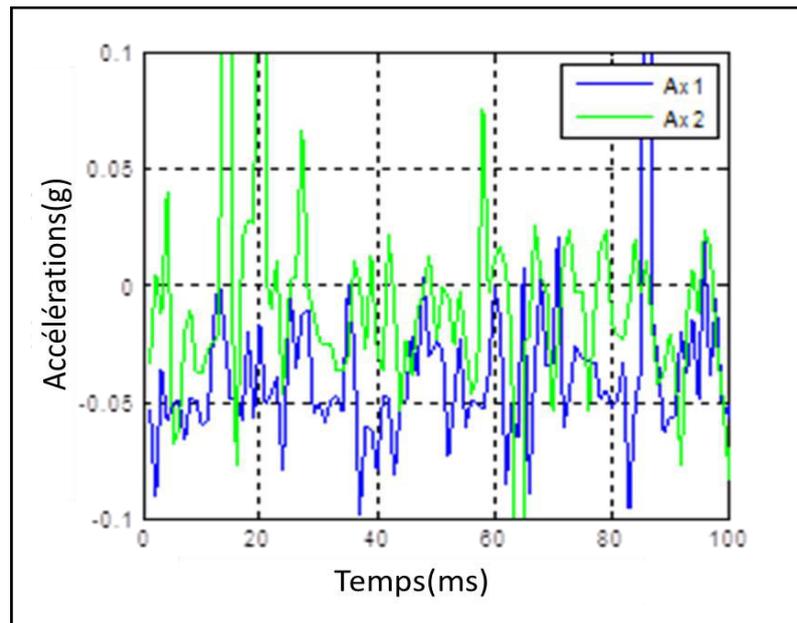


Figure 5. 12 Comparaison entre deux signaux d'accéléromètres placés à des distances différentes par rapport à l'axe de rotation

Les résultats trouvés soulignent la corrélation existante entre la distance et l'atténuation portées sur le signal, plus la distance augmente plus l'atténuation devient plus importante. Mis à part la communication, cela est dû essentiellement à la nature de la mesure délivrée par le capteur qui est plus susceptible à la variation de l'angle de rotation, lorsqu'il est placé loin de l'axe. Dans la suite l'intérêt est porté sur l'influence du capot sur la qualité de la communication.

5.2.3. Effet de la présence du capot sur la qualité de transmission

La présence de l'émetteur à l'intérieur de la machine (au-dessous du capot) engendre un effet de guidage qui se manifeste par des réflexions successives suivant deux obstacles parallèles. Un tel phénomène produit un déplacement global des ondes électromagnétiques selon la direction de ce guide. Un banc d'essai expérimental a été mis en place pour l'étude de ce phénomène. Il s'agit du même

banc illustré au niveau de la figure 5.13 avec une unique différence qui est liée à la présence du capot.

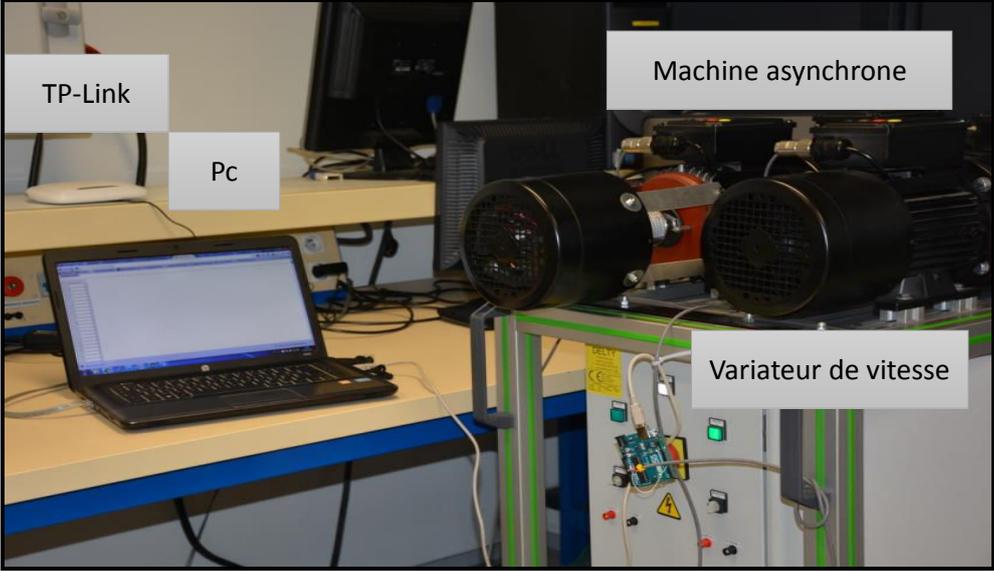
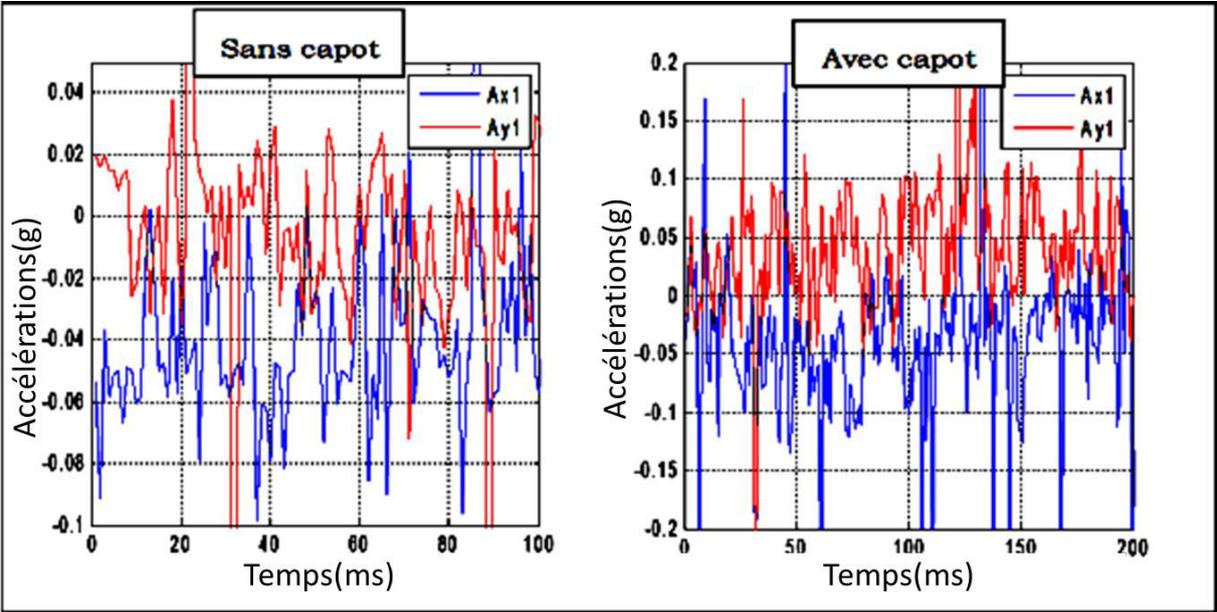


Figure 5. 13 Banc expérimental à base d'une MAS et en présence de capot

Nous illustrons dans la suite un comparatif des résultats trouvés pour une même valeur de vitesse en présence ou non du capot.



(a)

(b)

Figure 5. 14 Evolution temporelle du signal d'accélération avec et sans capot pour un même état de rotation (a. Sans capot, b. Avec capot)

L'analyse de l'évolution du signal d'accélération montrée sur les figures 5.14 permet de dire que les signaux se dégradent considérablement avec la présence du capot. Vu sa structure métallique, il présente un obstacle devant l'onde électromagnétique qui subit des phénomènes de guidage avant d'être émise. Il est important de tenir compte de tous ces phénomènes dans la conception des tels capteurs sans fils.

Au niveau de cette première partie de ce chapitre, nous avons testé la fiabilité de notre « smart capteur » pour une machine asynchrone. L'effet de l'emplacement du capteur et de la présence du capot sur la qualité du signal émis a été également signalé.

5.3. INTERET DE LA SURVEILLANCE DES VIBRATIONS

Le suivi du signal vibratoire permet de fournir des informations sur l'état de la machine d'une part et de trouver une corrélation entre les signaux observés et des mécanismes de dysfonctionnement typiques, en particulier ceux relatifs aux problèmes mécaniques (désalignement de l'axe, défauts rotoriques, ...) ou électriques. Cette analyse peut être utilisée par la suite pour définir les seuils d'alarme et de danger à partir desquels la décision de poursuite ou d'arrêt de la machine est prise (figure 5.15). D'autre part, ces signaux peuvent être utiles pour le diagnostic de la machine en présence d'un défaut.

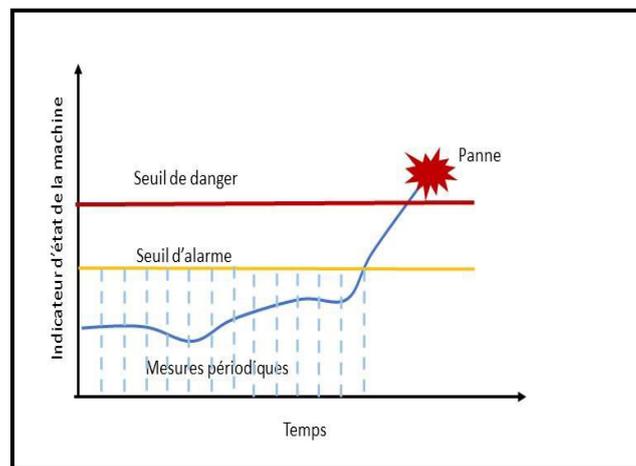


Figure 5. 15 Evolution des signaux de vibrations par rapport au temps

5.4. LIMITES DES SOLUTIONS FILAIRES EXISTANTES

Les mesures vibratoires sont généralement assurées par des sondes de mesures (figure 5.16). Les avantages des tels dispositifs sont liés à leur simplicité de mise en œuvre étant donné qu'ils ne requièrent pas un changement des équipements.

Cependant, leurs limites sont liées au manque de reproductibilité des mesures qu'ils délivrent. Etant donné que tous changements légers de leurs dispositions engendrent des profils incompatibles de vibrations (figure 5.16).



Figure 5. 16 Méthode manuelle pour la surveillance des vibrations

Une mise en place de capteurs à l'intérieur du moteur élimine certains des problèmes déjà signalés et permet d'avoir plus de flexibilité de mesure. De plus, le fait que les mesures peuvent être délivrées à distance aux centre de monitoring facilite la surveillance et accélère la maintenance ce qui augmente considérablement la durée de vie des équipements électriques.

5.5. SURVEILLANCE SANS FILS DES VIBRATIONS

Au cours de cette partie, nous proposons la mise en place d'un capteur sans fils à base d'accéléromètres en technologie MEMS pour la surveillance à distance des signatures de vibration. Une telle solution permet de faciliter l'accès aux grandeurs de la machine et de réduire le coût des installations des dispositifs de surveillance filaire.

Le nœud capteur développé au sein de la dernière partie, a été installé au niveau de l'arbre du moteur, (à titre de rappel ce nœud est à base d'accéléromètre ADXL 203 et de la carte ARDUINO pour le traitement des signaux sans fils. Le rôle de ce nœud consiste à capter les signatures puis les envoyer vers une IHM où ils sont récupérés et enregistrés. Pour étudier la fiabilité du dispositif pour la surveillance des vibrations dans les machines tournantes un banc de vibration a été utilisé pour injecter ces signaux en permanence au niveau de l'axe du moteur. La variation d'amplitude et de la fréquence des vibrations injectées est effectuée pour souligner leur impact sur le signal présentant un état de fonctionnement normal.

Un banc de tests expérimental a été conçu dans ce contexte. Ce banc est illustré sur la figure 5.17. Il est constitué principalement d'une machine à courant continu, d'une alimentation DC et d'un banc de vibration pour la génération des vibrations axiales (au niveau de l'axe en

rotation). L'alimentation du banc de vibration est achevée grâce à un amplificateur et un générateur à basse fréquences. La visualisation et le stockage des signaux sont effectués sur une page web et sont par la suite transmis à l'IHM développée sous l'environnement LABVIEW.

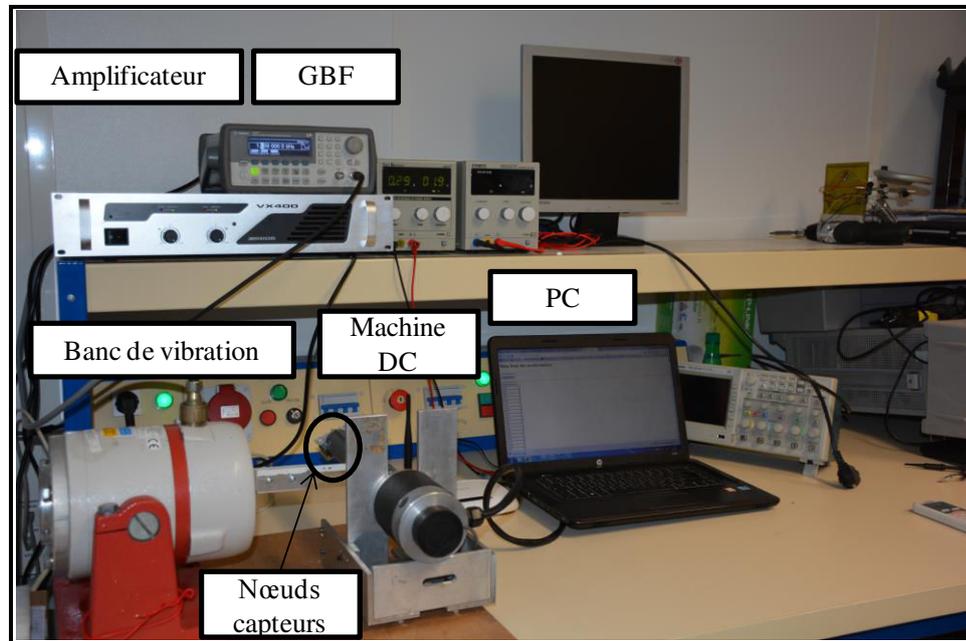


Figure 5. 17 Bancs d'essai expérimental

Le banc de vibration (E604) permet de générer un signal au niveau de l'axe du moteur qui est senti sur les signaux des accéléromètres. Plusieurs valeurs d'amplitudes et de fréquences des signaux de vibrations seront achevées pour le suivi de la variation des accélérations issues des capteurs vis-à-vis aux changements d'amplitudes et des fréquences de vibrations injectées.

5.5.1. Effet des vibrations sur l'évolution temporelle et spectrale du signal d'accélération

Nous proposons dans la suite un suivi des variations temporelles d'un signal d'accélération issu des capteurs MEMS avant et après l'injection des vibrations au niveau de l'axe du moteur. Le signal d'origine étant initialement perturbé, il est utilisé comme référence pour souligner tous les changements ayant eu lieu après l'injection des vibrations externes (voir figure 5.19). Les variations des signatures de vibrations ont été effectuées pour des fréquences et des amplitudes multiples pour mieux souligner la fiabilité d'un tel dispositif à assurer les suivis des signaux vibratoires. Ainsi toute augmentation d'amplitude ou de fréquence donnera naissance à une nouvelle réponse vibratoire

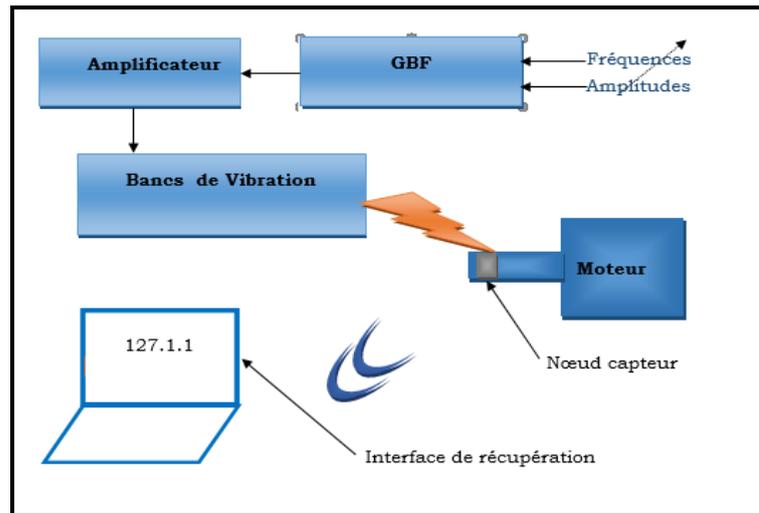


Figure 5. 18 Schématique de la stratégie proposée

5.5.2. Effet d'injection des vibrations sur l'accélération

- **Injection de vibration 200mV/500Hz**

Une première étude concernera l'injection du signal de vibration ayant une amplitude de 200mV/500Hz pour une vitesse de rotation de 39rad/s. La représentation temporelle et spectrale de ce signal avant et après injection de vibration est illustrée respectivement selon les figures 5.20. et 5.21. Une différence d'évolution entre ces deux signaux a été bien soulignée dans les domaines temporel et spectral d'étude.

L'injection des vibrations est bien repérée aussi bien au niveau temporel que spectral. Les évolutions temporelles montrent que les accélérations injectées sur l'axe x ont un effet de compensation sur le signal. En effet, au cours de son fonctionnement nominal l'axe du moteur présente un certain désalignement qui est relatif au poids des nœuds déposés au niveau de l'axe. L'introduction des vibrations axiales répétitives diminue cet effet (dans notre présent cas, ils présentent une forme en opposition de phase avec celle du signal d'origine). Ainsi au niveau spectral, en comparant les deux évolutions nous constatons un affaiblissement du terme de fondamental tout en gardant la même position de fréquence (décalage faible <1Hz).

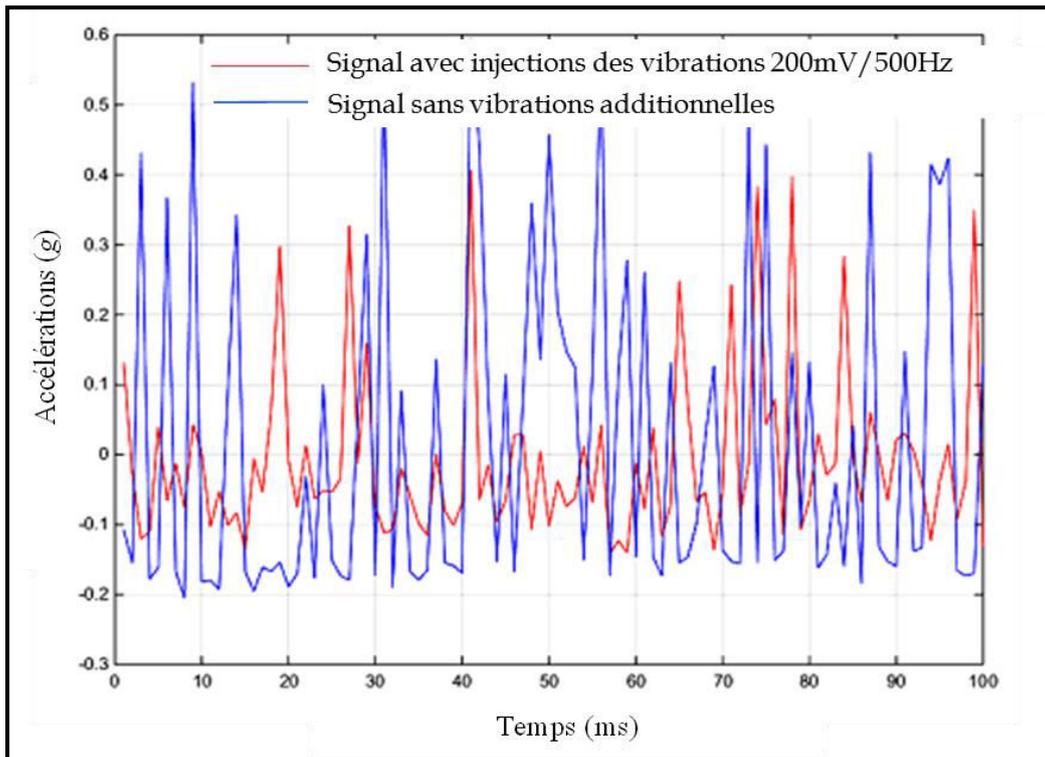


Figure 5. 19 Evolution temporelle d'accélération avant et après injection de vibration (200mV/500Hz)

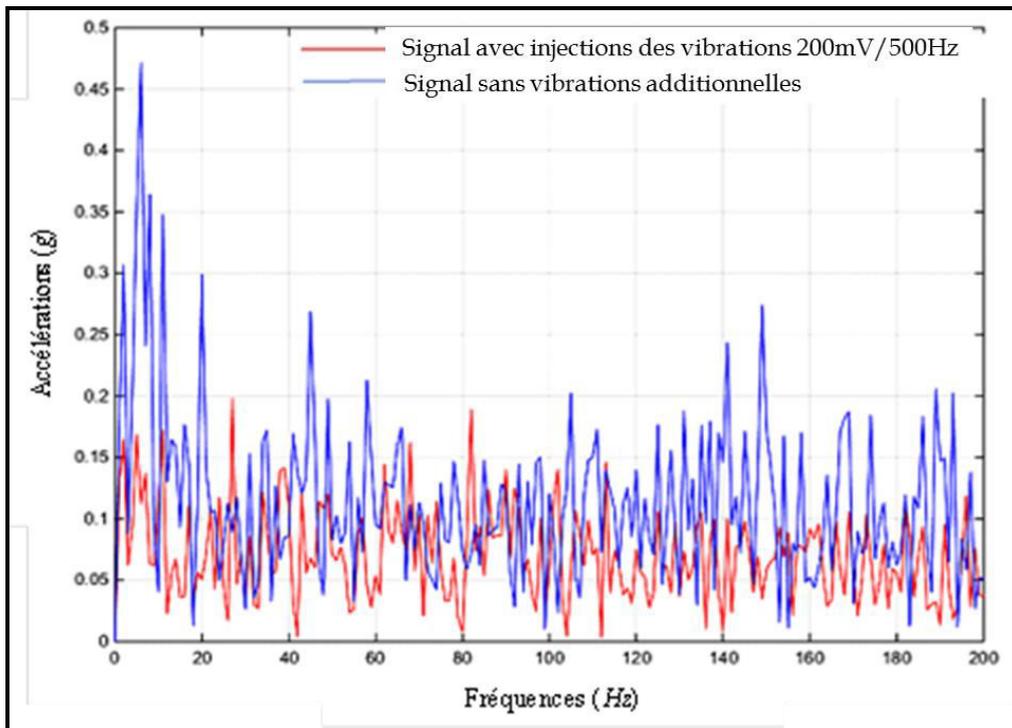


Figure 5. 20 Evolution spectrale d'accélération avant et après injection de vibration (200mV/500Hz)

- **Injection de vibration de 200mV/200HZ**

Nous procédons dans la suite à une modification de la fréquence de vibrations injectées (200mV/200Hz) afin de faire un suivi de leurs effets sur l'évolution du signal dans la Figure

5.21 et la Figure 5.22 au temps. Ainsi nous illustrons l'évolution spectrale et temporelle de ces signaux. L'impact de ces vibrations est repéré aussi bien au niveau temporel que spectral. La rectification de la fréquence a un rôle important dans le changement de l'évolution du signal. La présence des vibrations à 200Hz engendre une variation remarquable sur l'accélération en le comparant à celle qui correspond à 500Hz.

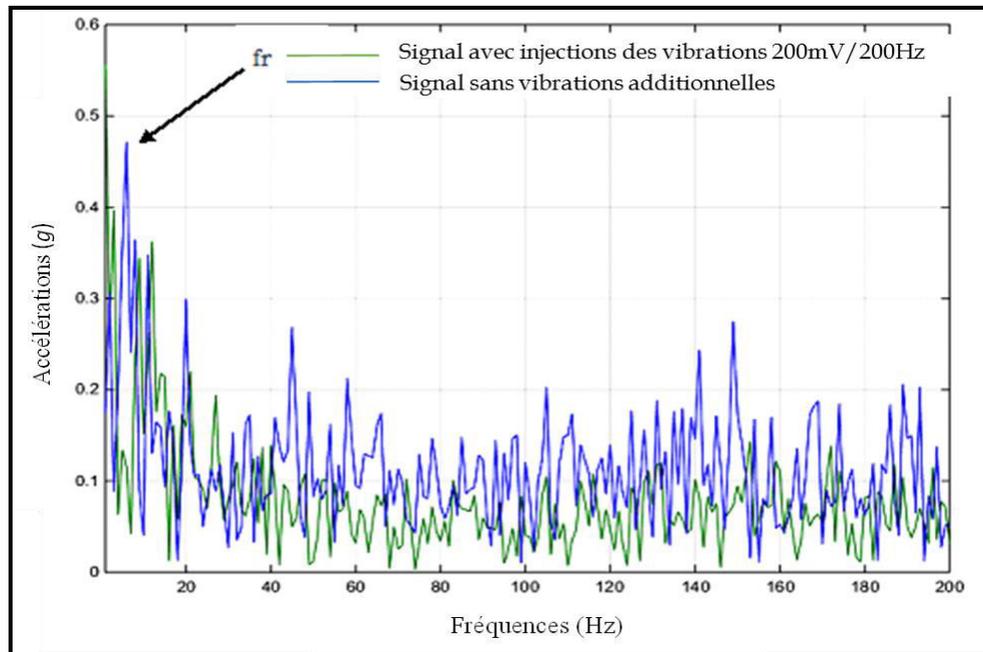


Figure 5. 21 Evolution temporelle du signal avec variation d'amplitude de signal de vibration

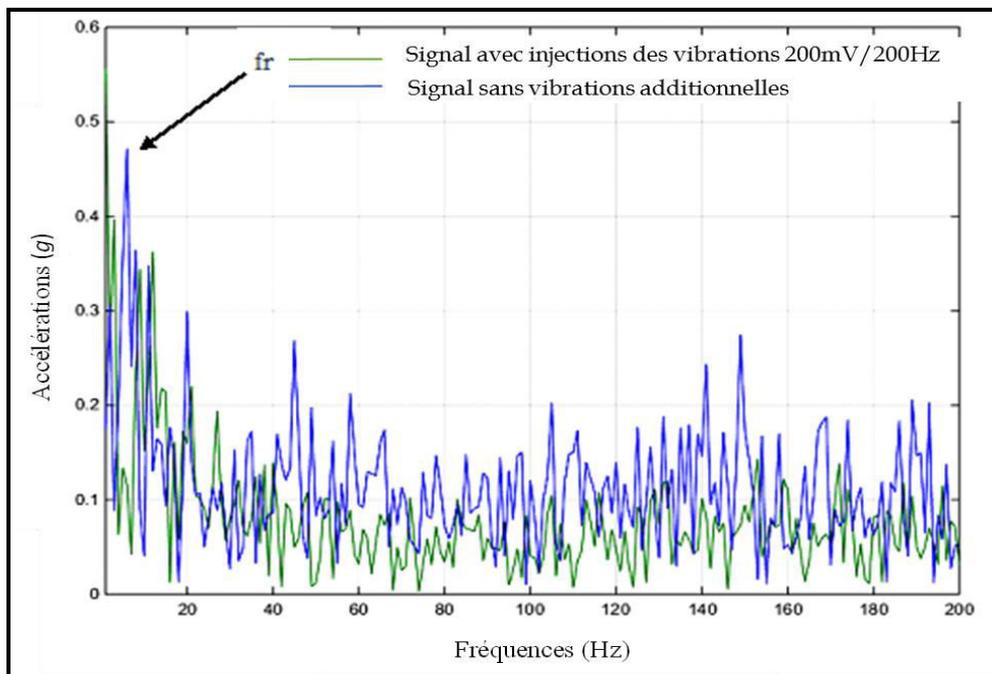


Figure 5. 22 Evolution spectrale d'accélération avant et après injection de vibration (200mV/200Hz)

- **Comparatifs**

Pour mieux souligner la différence entre les deux cas de fonctionnement (ajout d'une vibration 200mV/500Hz et d'une vibration 200mV/200Hz). Une telle étude comparative a été menée dans la suite. Il est noté que le système d'étude est plus susceptible aux vibrations à faibles fréquences (200Hz) qu'à celle de plus hautes fréquences (500Hz).

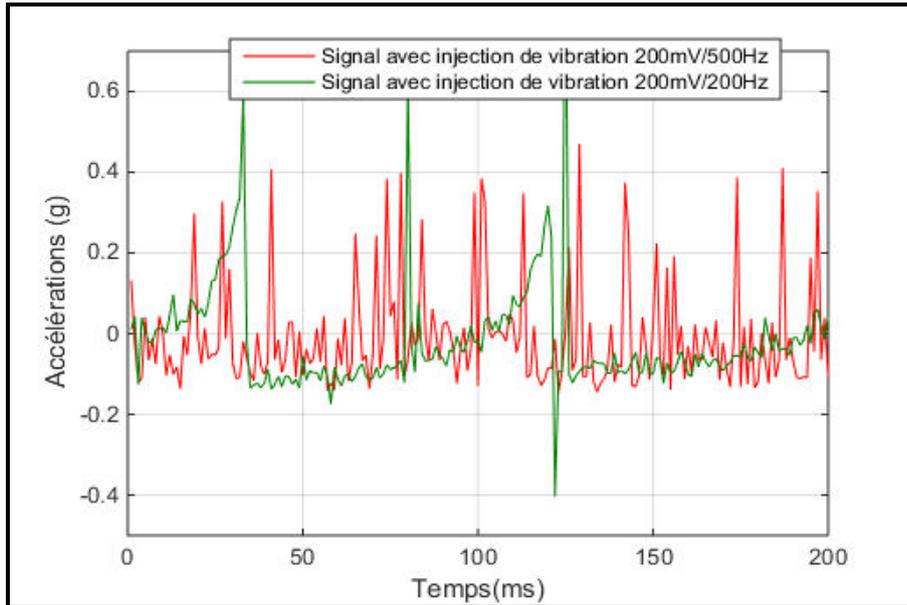


Figure 5. 23 Comparaison entre l'évolution temporelle d'accélération après l'injection de vibration de 200mV/500Hz et celle de 200mV/200Hz

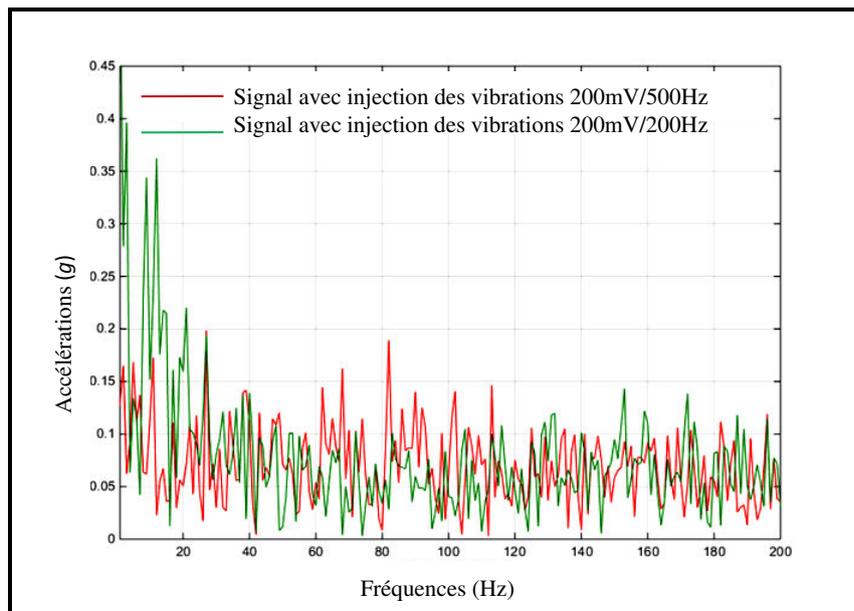


Figure 5. 24 Evolution temporelle d'accélération avant et après injection des vibrations

Les résultats trouvés soulignent la fiabilité de dispositifs pour une détection possible des vibrations. Le changement de la fréquence de vibrations injectées est repéré au niveau de l'évolution spectrale du signal du capteur.

5.5.3. Variation des amplitudes des vibrations injectées

La variation de l'amplitude a également son effet sur le signal issu du capteur. Ainsi, l'évolution du signal d'accélération suite à l'injection d'un signal de vibration ayant trois amplitudes de vibration différentes à savoir 200mV/300mV/400mV est représentée sur la figure 5.25. On observe que l'amplitude relative au fondamentale f_r et des harmoniques proportionnels $2f_r$, $3f_r$, $4f_r$ augmentent considérablement proportionnellement à l'amplitude des vibrations injectées. Plus l'amplitude de vibration augmente plus les harmoniques de rangs supérieurs ont des amplitudes importantes.

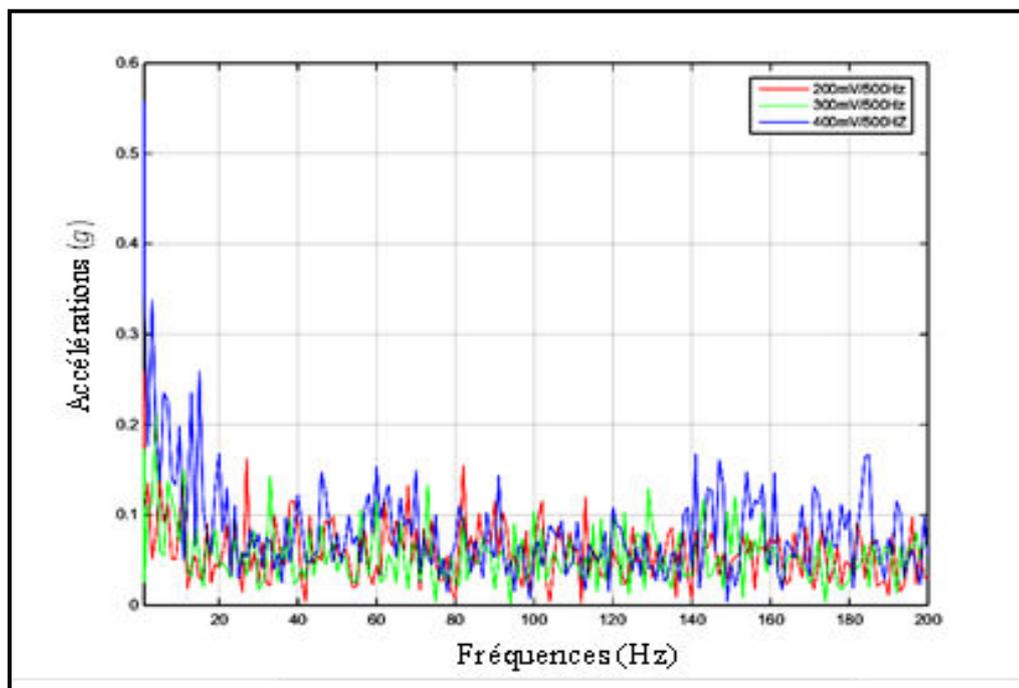


Figure 5. 25 Effet de variation d'amplitude des vibrations sur l'évolution spectrale du signal

Les résultats de cette étude sont illustrés au niveau du tableau (Tab.5.2, Tab 5.3 et Tab 5.4). Nous constatons que les coefficients des harmoniques du rang supérieurs varient proportionnellement avec l'amplitude des signaux vibratoires injectés.

Table 5. 2 Réponse spectrale suite à une injection des harmoniques 200mV/500Hz

Fréquence(Hz)	5	7	11	14	17	22	24	27	31	34	39
Amplitude(g)	0.1	0.11	0.14	0.05	0.09	0.08	0.09	0.19	0.07	0.09	0.1

Table 5. 3 Réponse spectrale suite à une injection des harmoniques 300mV/500Hz

Fréquences(Hz)	5	7	11	14	17	19	24	29	33	38	43
Amplitudes(g)	0.214	0.137	0.151	0.09	0.07	0.089	0.07	0.08	0.14	0.09	0.085

Table 5. 4 Réponse spectrale suite à une injection des harmoniques 400mV/500Hz

Fréquences(Hz)	3	6	10	13	15	20	22	24	28	33	35
Amplitudes(g)	0.34	0.23	0.19	0.23	0.25	0.16	0.13	0.11	0.08	0.07	0.05

Les signatures de vibration sont bien détectées aussi bien au niveau spectral que temporel. Cette étude sera améliorée lors des prochains travaux par une recherche des critères les plus pertinents pour une meilleure surveillance. Ceux-ci illustrent la capacité de détection de ce défaut (vibration axiale) autant par l'analyse spectrale que temporelle. Ainsi, nous pouvons conclure que la solution proposée avec un dispositif sans fils unique pour la mesure de la vitesse et la surveillance des anomalies (vibrations) d'un actionneur tournant est faisable.

5.5.4. Réponse des capteurs suite à une variation de la vitesse de rotation et une injection des vibrations

Au cours de cette partie nous proposons d'injecter des vibrations d'amplitude différentes (200mV, 300mV et 400mV) tout en faisant varier la vitesse de la rotation du moteur. Dans ce cas, une vitesse de 27 rad/s est considérée. Les résultats relatifs aux évolutions des signaux d'accélération récupérés suite aux différentes valeurs d'amplitude du signal de vibration sont illustrés dans la suite. Comme dans le cas précédent, nous constatons que l'amplitude des harmoniques augmente considérablement avec l'amplitude des vibrations injectées (Figure 5.26)

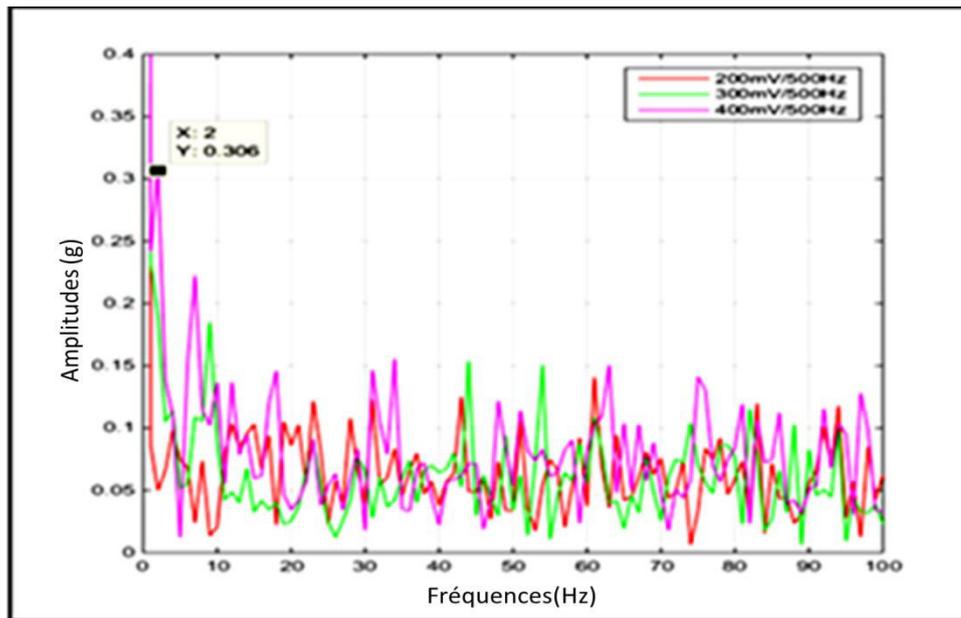


Figure 5. 26 Evolution spectrale du signal avec injection d'un signal de vibration pour une vitesse de rotation de 13rad/s

Nous procédons maintenant à un changement de la vitesse de rotation afin de voir le comportement spectral des signaux récupérés suite à diverses perturbations vibratoires (figure 5.27). Les signaux dans ce cas présentent des évolutions différentes nous pouvons donc conclure que le comportement des signaux suite à différentes vibrations injectées varie avec l'état initial du dispositif pour lequel l'effet d'une injection peut (augmenter l'amplitude des harmoniques ou les diminuer). Un suivi plus fin, consiste à prendre un nombre important d'acquisitions pour différentes vitesse de rotation

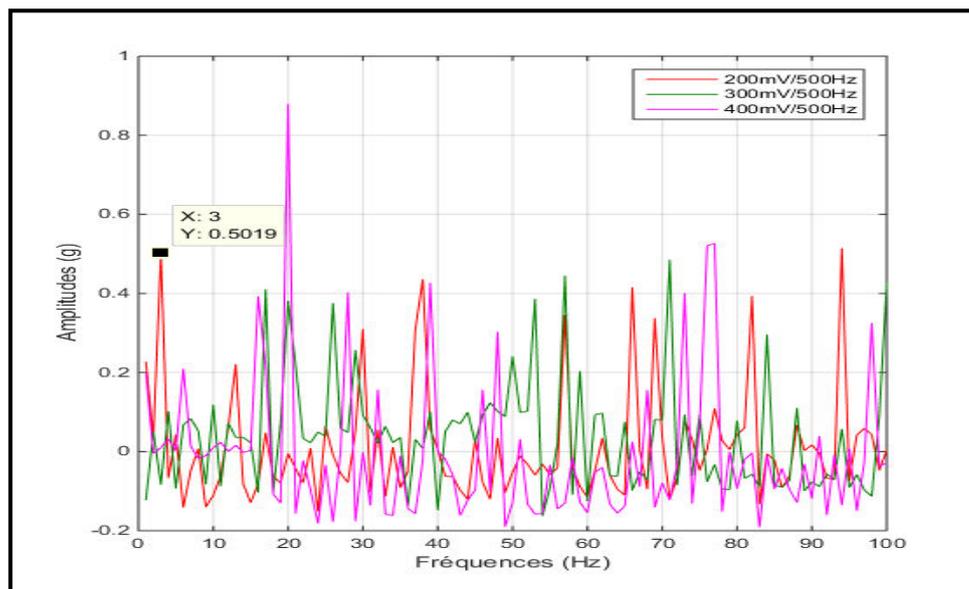


Figure 5. 27 Evolution spectrale du signal avec injection d'un signal de vibration pour une vitesse de rotation de 27rad/s

D'un autre côté, il est important de noter que les signaux de vibrations sont importants pour le diagnostic et la surveillance mais aussi pour la récupération d'énergie qui peut être utile pour l'alimentation des nœuds capteurs par exemple. Cela peut être considéré comme étant des perspectives à nos travaux.

Dans ce qui suit une Interface Homme Machine sera développée pour mieux visualiser les résultats trouvés.

5.6. DEVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE HOMME MACHINE POUR LE SUIVI DES SIGNAUX DE VIBRATIONS

L'objectif de cette partie consiste à concrétiser les résultats trouvés et les rendre plus accessibles et significatifs par l'utilisateur en développant une interface Homme machine (IHM). Cette interface permettra d'assurer la visualisation et le contrôle à distance des signaux issus des accéléromètres ADXL203 qui sont placés au niveau de l'arbre de la machine. D'autre part, elle permet d'assurer le suivi des valeurs instantanées des sorties des capteurs et la détermination de la valeur de la vitesse à partir des outils de traitement développés dans les sections précédentes. Un choix a été porté sur l'environnement LABVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Work-bench) qui est un logiciel de programmation et de développement de cette interface. Ce logiciel est considéré comme étant un des meilleurs outils de développement des interfaces graphiques permettant d'assurer le contrôle, l'analyse, l'acquisition et le traitement de données. Le programme développé sous LABVIEW est basé essentiellement sur deux parties principales à savoir la partie connexion et la partie acquisition et affichage des signaux visualisés. L'interface utilisateur est la partie fondamentale du programme puisque elle est en liaison directe avec l'opérateur. Son développement nécessite la prise en compte de certains critères liés essentiellement à l'application envisagée à savoir l'attractivité et la simplicité de l'utilisation.

Le programme principal de développement de l'IHM est basé sur trois étapes essentielles qui sont illustrées sur la Figure 5.28



Figure 5. 28 Architecture du programme principal

Nous détaillerons dans la suite chacune des phases décrites ci-dessus

5.6.1. Initialisation des ports

L'accès à la base de données via LABVIEW nécessite l'ouverture d'une connexion TCP/IP. Pour ce faire deux paramètres sont à définir l'adresse et le port de serveur.

- **Initialisation de la réception des paquets**

L'ouverture d'une connexion TCP permet de créer une identification qui assure l'écoute du serveur souhaité. Grâce à la fonction « TCP lire » la lecture des 4 octets relatifs à cette connexion est achevée et les données sont envoyées à la sortie. Elles seront par la suite converties et stockées dans un tableau. Les sorties de ce tableau, seront par la suite regroupées pour construire un paquet d'initialisation TCP/IP au serveur.

- **Initialisation des données coté serveur**

L'initialisation des données par le serveur nécessite la déclaration des différents composants comme la version du protocole, la version du serveur, l'identification de Thread, la préparation du Buffer, la capacité et le statut du serveur ainsi que le langage utilisé. Ces différents éléments sont regroupés dans un cluster définissant les caractéristiques des données du serveur.

- **Initialisation des données coté client**

L'initialisation de réception des données par le client requière une authentification à la base de données, seul le mot de passe sera encrypté par une fonction développée par l'environnement LABVIEW. Cette procédure définit la capacité du client et la taille maximum du paquet reçu. Les informations seront regroupées dans un cluster pour décrire les caractéristiques des données du client.

- **Procédure d'envoi des paquets**

Au niveau de cette étape l'envoi des paquets vers la connexion TCP est achevé. La fonction « TCP écrire » crée un identificateur de connexion qui assure l'envoi des paquets.

- **Contrôle des paquets**

Pour mieux garantir l'envoi du paquet, la fonction « Retun paquet » a été développé pour définir le cycle de vie de données. En relation directe avec la procédure d'envoi.

5.6.2. Récupération des données

Une fois que la connexion à la base est établie, une requête est envoyée à MySQL pour extraire l'information relative à l'accélération. La fonction « Send command » permet de garantir l'envoi d'une requête. Une fois la requête récupérée, la procédure d'envoi des paquets est enclenchée.

A la réception de paquet, MySQL l'exécute et renvoie les informations qui correspondent à la requête envoyée. Les données seront captées par la fonction « Return packet ».

5.6.3. Fermeture de la connexion

Les connexions et les jeux de résultats ouverts de façon non persistants sont automatiquement détruits lorsqu'un script PHP termine son exécution. Aussi, le fait de fermer une connexion et libérer les résultats étant optionnel, le fait de le faire explicitement est néanmoins vivement recommandé. Ceci va renvoyer les ressources immédiatement à PHP et à MySQL, ce qui va améliorer les performances. De ce fait, la fonction « Close » ferme la connexion non persistante au serveur MySQL associée à l'identifiant spécifié.

5.6.4. Visualisation des résultats

La figure 5.29 représente l'évolution de l'accélération mesurée par les accéléromètres en technologie MEMS sur l'interface développée sur LABVIEW.

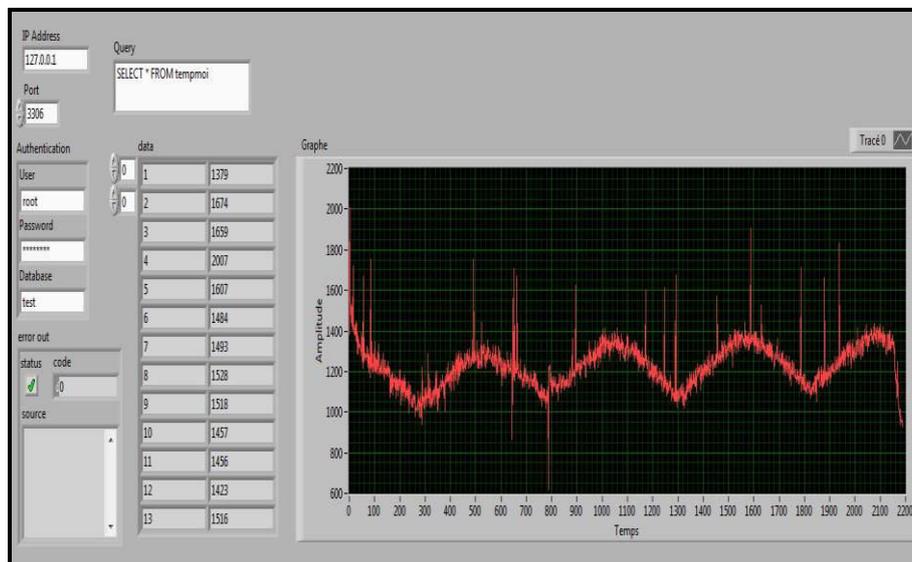


Figure 5. 29 Interface Homme Machine

5.7. CONCLUSION

Un simple dispositif sans fils permettant le suivi à distance des signaux de vibrations pour les machines électriques tournantes a été proposé dans ce chapitre. Le rôle d'un tel dispositif dans l'amélioration de la robustesse et la fiabilité des systèmes d'entraînement électriques a été bien souligné. Une interface Homme machine a été développé sur LABVIEW. Cette dernière permet d'assurer le suivi de l'état des capteurs et d'afficher les signaux qu'ils délivrent.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au cours de ce travail une nouvelle approche de contrôle et de surveillance à distance des actionneurs tournants a été proposée. Le choix a été porté sur les accéléromètres en technologie MEMS comme étant des capteurs multifonctionnels bénéficiant d'une miniaturisation, d'un faible coût et permettant la détermination de la vitesse de rotation du moteur et la surveillance à distance des vibrations relatives au moteur pour une maintenance préventive. Un dispositif expérimental et un nœud capteur ont été mis en place pour la réalisation de cette tâche. Mis à part l'étude sans fils déjà achevées une étude filaire a été effectuée afin de souligner la fiabilité des données sans fils récupérés.

Les accélérations récupérées ont servi pour la détermination de la vitesse de rotation du moteur. Cette tâche a pu avoir lieu grâce à une redondance matérielle en premier lieu, ensuite et grâce à un appel à des algorithmes à base de variance d'Allan qui ont été évalués pour deux types de dispositifs à savoir la machine à courant continu et la machine asynchrone.

Des tests multiples ont été menés et des algorithmes déjà développés ont été testés pour différentes valeurs de vitesse pour prouver la fiabilité de l'approche proposée pour la détermination de la vitesse de rotation de la machine tournante.

De plus, une des contraintes majeures résolue au sein de ce travail a été le développement d'un nœud capteur intelligent qui consiste à réduire la consommation énergétique des nœuds capteurs. Cela s'avère possible par l'effet d'un traitement à des données et une connaissance de leur évolution à priori. Ainsi un appel à la technique des AG a été effectué pour l'élaboration des signaux dit de références et grâce à cet algorithme une modélisation analytique du signal du capteur était possible.

La fiabilité de l'approche proposée a été évaluée aussi bien pour une machine à courant continu que pour une machine asynchrone.

Enfin, Pour mieux concrétiser les résultats une IHM a été développée sur l'environnement LABVIEW. Cette interface permet la visualisation des accélérations issues des différents capteurs pour une surveillance en ligne.

Au niveau de ce travail une solution de capteur intelligent a été proposée. Cette solution peut être améliorée par l'ajout d'une partie d'auto-alimentation par signaux de vibration qui fera l'objectif suivant de nos travaux de recherche

Une recherche d'un algorithme permettant la détermination du couple relatif au moteur est envisagée ce qui permettra d'offrir une solution complète de contrôle et de surveillance à distance.

Mis à part les données relatives à l'accélération nous procédons au contrôle des différentes grandeurs à savoir le courant et les tensions statoriques pour avoir une machine intelligente « SMART ELECTRICAL MOTOR » ou toutes les grandeurs pourront être accessibles à distance.

L'avancement technologique a permis d'offrir des nouvelles perspectives sur le contrôle des machines tournantes à distance et à s'affranchir les contraintes reliées aux dispositifs filaires. La solution offerte au sein de ces travaux ouvre de nouvelles perspectives et déclenche des nouveaux débats pour une amélioration des performances

Annexes



ANNEXE (A) IDENTIFICATION PARAMÉTRIQUE DE LA MACHINE MAS PAR AG

1. CHOIX DU MODELE

Le choix du modèle est une partie importante pour aboutir à des meilleurs résultats d'identification. Au cours de cette partie, pour des raisons de simplicité un choix a été porté sur ce modèle

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}}{dt} = a_1 \cdot i_{s\alpha} - \omega \cdot i_{s\beta} + a_2 \cdot \phi_{s\alpha} + a_3 \cdot \omega \cdot \phi_{s\beta} + a_3 \cdot v_{s\alpha} \\ \frac{di_{s\beta}}{dt} = \omega \cdot i_{s\alpha} + a_1 \cdot i_{s\beta} + a_2 \cdot \phi_{s\beta} - a_3 \cdot \omega \cdot \phi_{s\alpha} + a_3 \cdot v_{s\beta} \\ \frac{d\phi_{s\alpha}}{dt} = -R_s \cdot i_{s\alpha} + v_{s\alpha} \\ \frac{d\phi_{s\beta}}{dt} = -R_s \cdot i_{s\beta} + v_{s\beta} \\ \frac{d\omega}{dt} = a_4 \cdot \phi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - a_4 \cdot \phi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha} + a_5 \cdot \omega + a_6 \cdot C_r \end{array} \right.$$

Avec:

$$\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_r \cdot L_s}, L_f = \sigma \cdot L_s, a_2 = \frac{R_f}{L_f \cdot L_r}, a_3 = \frac{1}{L_f}, a_4 = \frac{p_0^2}{J}, a_5 = -\frac{f}{J}, a_6 = -\frac{p_0}{J}.$$

En effet, à partir des données expérimentales des tensions et des courants, la tâche d'identification a été achevée. Cette dernière consiste à déterminer les différents coefficients ($a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$) du modèle décrit ci-dessus. L'algorithme génétique a été utilisé pour assurer cette tâche.

2. METHODOLOGIE

La bonne connaissance des paramètres électriques et mécaniques relatifs à une machine électrique est une tâche primordiale afin de garantir la robustesse et la sûreté de fonctionnement du système d'entraînement global. Ces paramètres interviennent au niveau de la modélisation et du contrôle. D'où vient l'intérêt de cette partie qui sera focalisée sur l'identification paramétrique par AG. L'utilisation de ce type d'algorithme est liée aux faits

qu'il ne nécessite pas une bonne initialisation des paramètres qui est un obstacle pour les autres méthodes déterministes.

De ce fait, à partir des données expérimentales des tensions et des courants, l'identification sera achevée. Cette dernière consiste à déterminer les différents coefficients ($a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$) du modèle pour avoir un minimum d'écart quadratique entre les valeurs des courants mesurées et celles déterminées à partir du modèle ayant comme entrée la même valeur des tensions que celle du moteur. Le principe de la méthodologie est illustré sur la figure 5.1

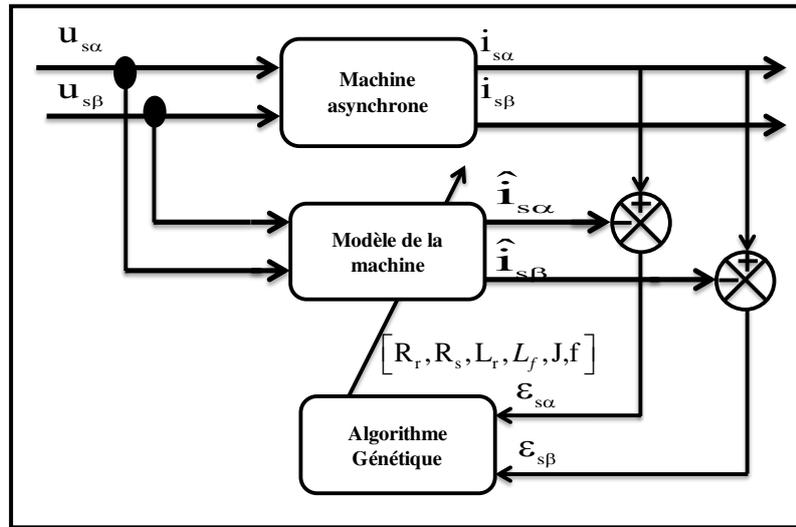


Figure A.1 Principe de la méthodologie de l'identification par AG

Le vecteur des paramètres électriques et mécaniques de la machine déterminés avec l'algorithme ainsi développé est représenté selon ce vecteur $[R_r, R_s, L_r, L_f, J, f]$. La fonction coût utilisée représente l'erreur quadratique moyenne entre le courant réel et celui estimé et elle est décrite sous cette expression

$$f_c = \sum_{k=1}^N (\tilde{i}_{s\alpha}^2(k) + \tilde{i}_{s\beta}^2(k))$$

Avec $i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ représentent les valeurs des courants mesurés

$\hat{i}_{s\alpha}, \hat{i}_{s\beta}$ sont les valeurs estimés

$$\tilde{i}_{s\alpha} = i_{s\alpha} - \hat{i}_{s\alpha}, \tilde{i}_{s\beta} = i_{s\beta} - \hat{i}_{s\beta}$$

N est le nombre des échantillons des vecteurs courants.

3. RESULTATS DE SIMULATION

Les performances de l'algorithme proposé ont été testées sur une machine dont on connaît les paramètres avant de les appliquer sur le cas réel.

Les résultats relatifs aux courants réels et estimés sont représentés selon la figure B.2

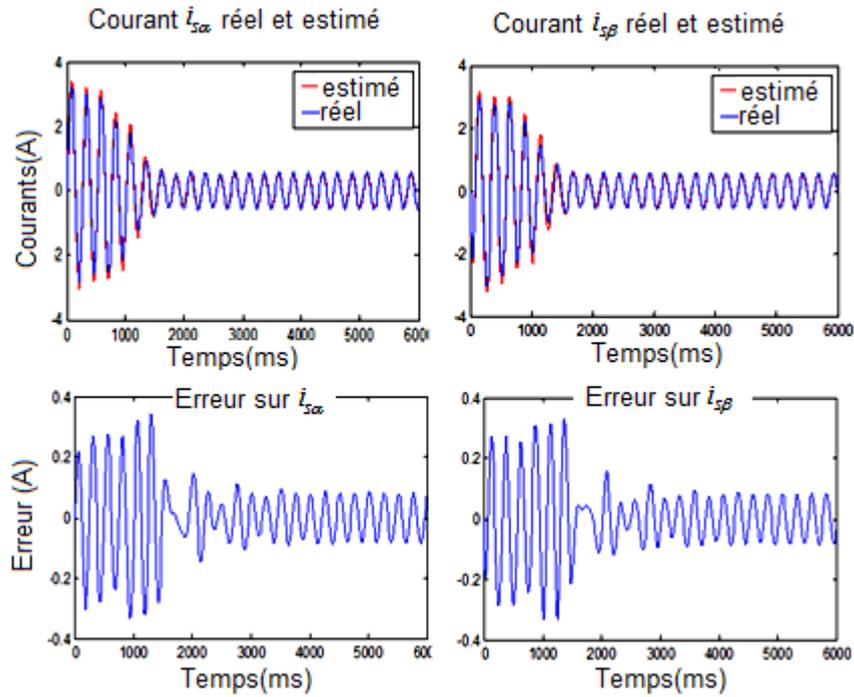


Figure A.2. Evolution des courants réels et estimés

Table A.1. Résultats d'identification de la machine simulée

PARAMETERS	Real	Estimated	Relative error (%)
$R_R (\Omega)$	15	15.2644	1%
$R_S (\Omega)$	37.5	37.4267	7%
$L_R (H)$	1.06	1.07	1%
$L_S (H)$	1.35	1.3691	1.4%
$J (KG.M^2)$	$6.8.10^{-4}$	$6.35.10^{-4}$	6%
$F (KG.M^2/S)$	$1.2.10^{-4}$	$1.4.10^{-4}$	16%

Les figures A.2 illustrent l'évolution des courants réels ainsi que ceux estimés. Nous constatons une grande corrélation entre les deux, l'erreur des deux courants ne dépasse pas les milliampères. Les résultats relatifs aux différents paramètres sont illustrés sur le tableau ci-joint. En effet l'erreur est très faible et ne dépasse pas 1%, pour les paramètres électriques et 16% pour ceux mécaniques.

4. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Après la validation du modèle par simulation nous passons maintenant au cas réel. Des acquisitions ont été achevées au niveau de cette partie avec le banc d'essai illustré sur la figure A.3. Les tests ont été effectués sur une seule machine après nous procédons dans ce qui suit à la tâche d'autopilotage

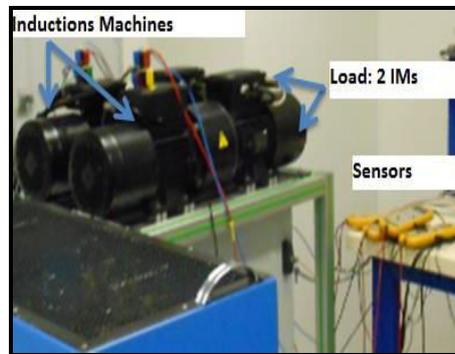


Figure A.3 Banc expérimental de test

5. TEST EXPERIMENTAUX ET DETERMINATION DES PARAMETRES ELECTRIQUES ET MECANIQUES

Les figures ci-dessus présentent l'évolution des courants réels et estimés par AG relatives à la première machine. En effet, nous avons testé les deux machines séparément pour la détermination précise des paramètres. Les paramètres relatifs à la deuxième machine sont déterminés d'une façon similaire que celle de la première.

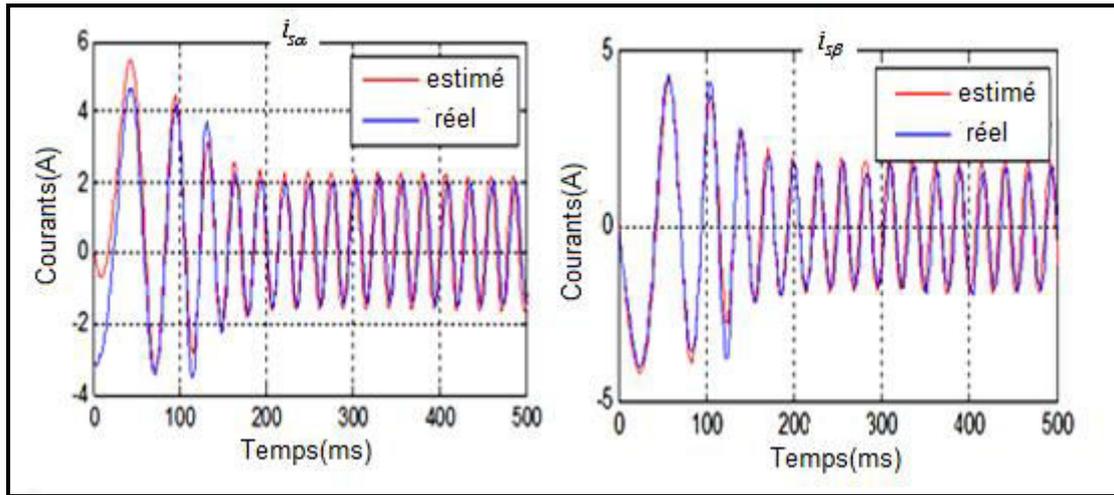


Figure.B.4 Evolution des courants réels et ceux estimés

Les résultats trouvés sont illustrés sur ce tableau

Table C.2 Résultats d'identifications par AG

Paramètres	Rr (Ω)	Rs(Ω)	Lr(H)	Lf(H)	J(m ² kg)	f(m ² kg/s)
AG	2.233	5.509	0.2056	0.1434	0.0047	0.0018
Tests conventionnels	2.48	5.57	0.467	0.319	5.33.10 ⁻³	3.8.10 ⁻³

ANNEXE (B) RÉALISATIONS EXPÉRIMENTALES ET TYPONS

1. TYPONS

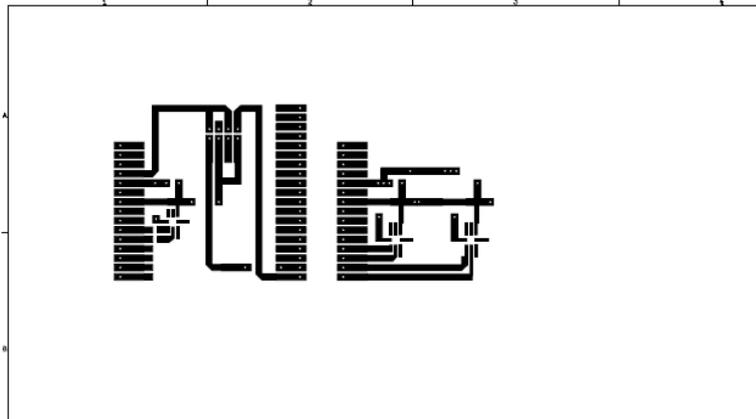


Figure B.1 Emplacement des accéléromètres par rapport à l'axe de rotation cas de la MAS

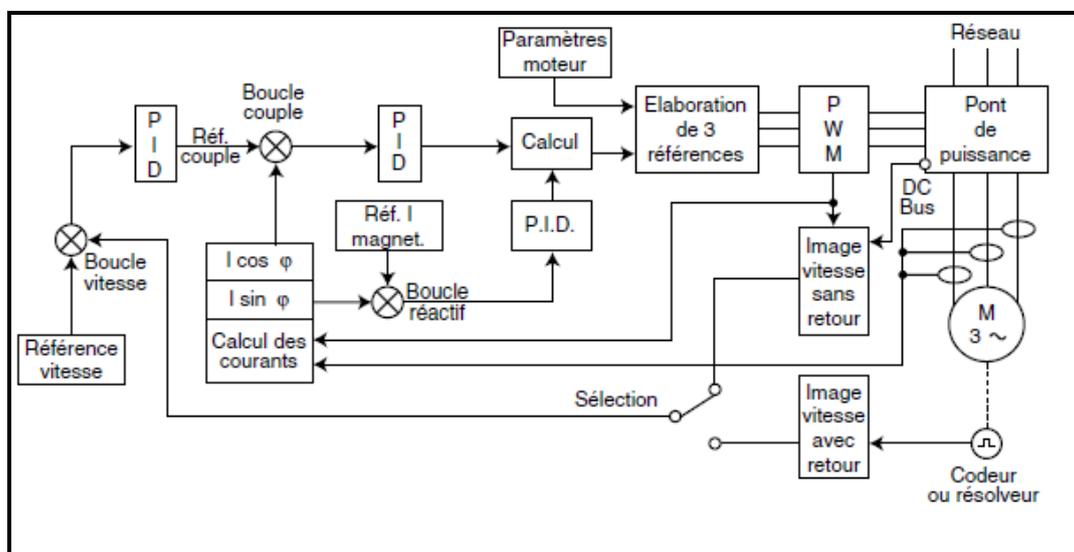


Figure B.2 Principe de contrôle de vitesse au niveau du variateur de la MAS

ANNEXE (C) PROGRAMME DE L'IHM DÉVELOPPÉ SUR LABVIEW

Nous illustrons au niveau de cette partie le code qui a été développé sur LABVIEW. La figure C.1 illustre le code principal d'IHM qui est composé essentiellement de trois étapes fondamentales à savoir : l'initialisation, la récupération et la fermeture de connexion. Ces différentes étapes seront bien développées dans la suite

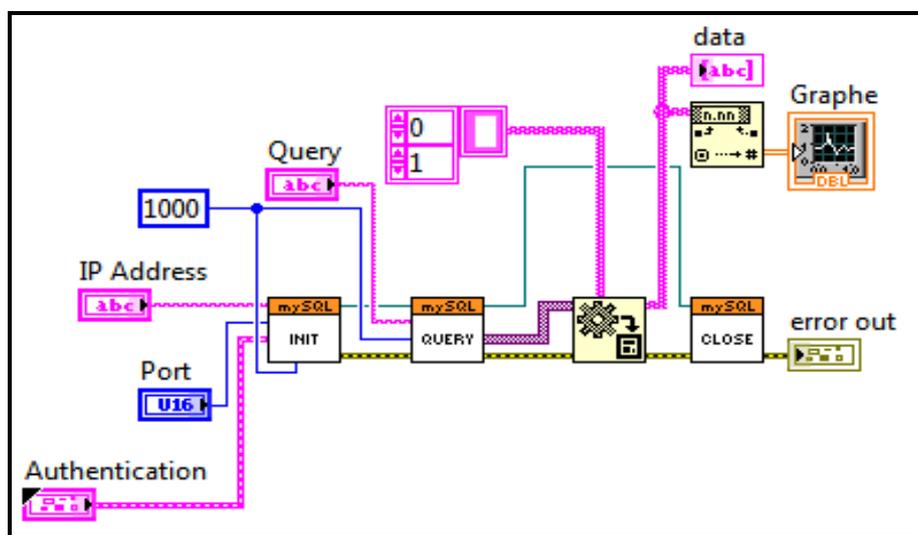


Figure C.1 Code de l'IHM

1. INITIALISATION

La première phase d'initialisation est représentée sous la forme d'une machine d'état à quatre étapes (figure C.2) à savoir l'initialisation de réception du paquet, initialisation des données coté serveur, initialisation des données coté client, l'envoi des données et le contrôle du paquet. L'accès à la base de données par LABVIEW est assuré grâce à une connexion TCP/IP. Deux paramètres sont essentiels à définir à savoir l'adresse et le port de serveur.

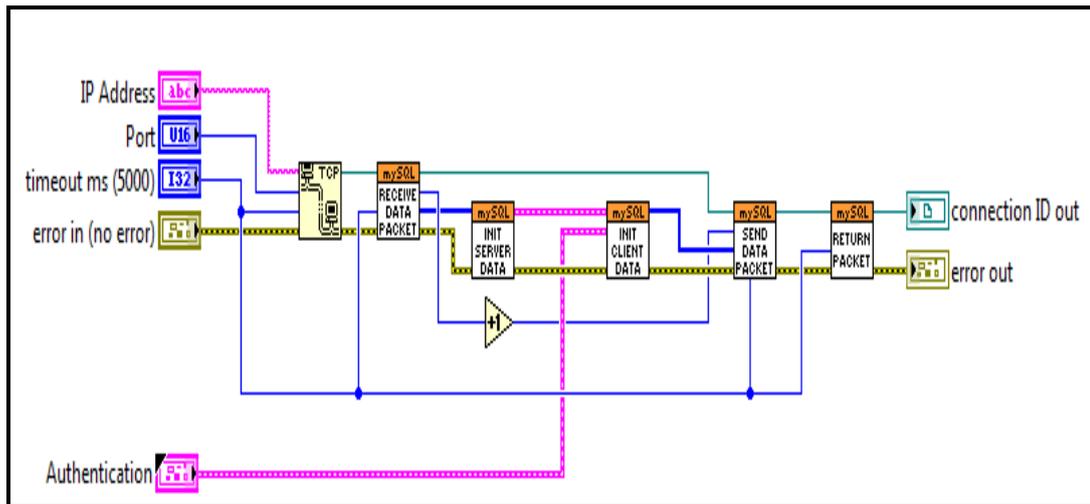


Figure C.2 Phase d'initialisation

2. INITIALISATION LA RECEPTION DES PAQUETS

A l'ouverture d'une connexion TCP une écoute de serveur désigné s'enclenche. La figure C.3 décrit la chaîne conditionnelle assurant la création des paquets au niveau du serveur.

La fonction « TCP lire », fonction de base de cette chaîne ; permet la lecture de 4 octets de cette connexion et renvoie des données à la sortie. Ces derniers seront par la suite convertis et stockés dans un tableau (d'octets non signés). A la sortie du tableau, les composants seront regroupés (sup, inf) pour construire une paquet d'initialisation TCP/IP au server.

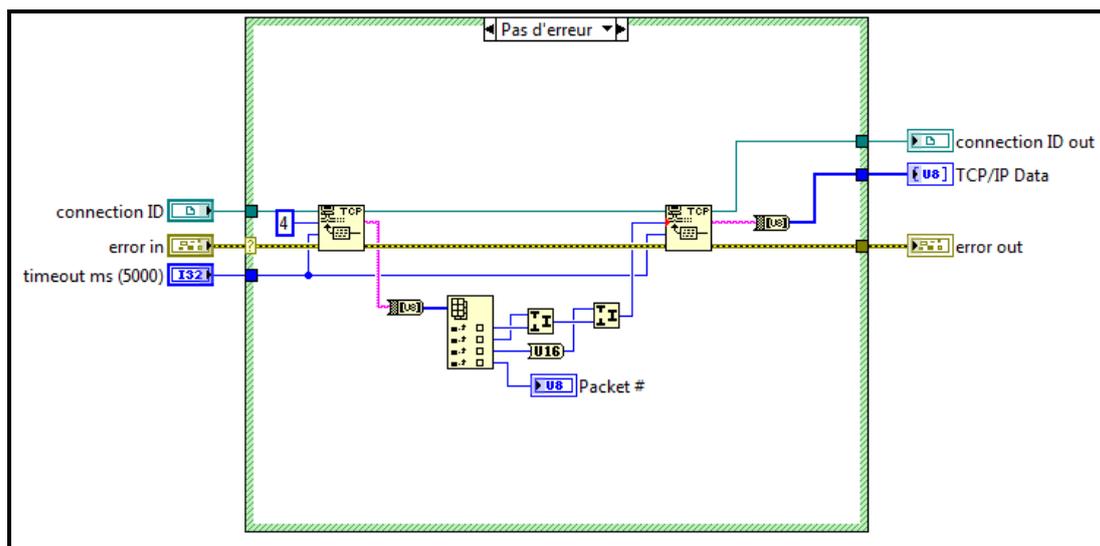


Figure C.3 Réception des Paquets

3. INITIALISATION DES DONNEES COTE SERVEUR

L'opération d'initialisation des données par le serveur nécessite la déclaration des sept éléments présentés sur la figure C.4 et qui sont détaillés dans la suite

- Version du protocole : cet élément correspond à l'indice 0 dans le paquet TCP/IP
- Version du serveur : elle est construite à partir de l'indice de l'élément 0 du paquet. Cette version représente un sous ensemble du tableau de paquet ayant comme longueur « indice(0)-1 ».
- L'identification de Threadest une portion du tableau de paquet commençant à partir de l'« indice(0) +1 » et incluant quatre éléments.
- La préparation du Buffer : le Buffer est une zone de mémoire sous la forme d'une concaténation de deux tableaux de taille 20 et elle est construite à partir du paquet TCP/IP.
- La capacité du Serveur : est construite à partir de reste du tableau paquet, précisément la suite de deux premiers éléments du tableau.
- Le langage utilisé : il est extrait de la 3ème case du tableau de paquet
- Le statut du serveur : il est défini par les derniers éléments du paquet TCP/IP.

Dès leur création, les différents éléments seront regroupés dans un cluster définissant les caractéristiques des données du serveur.

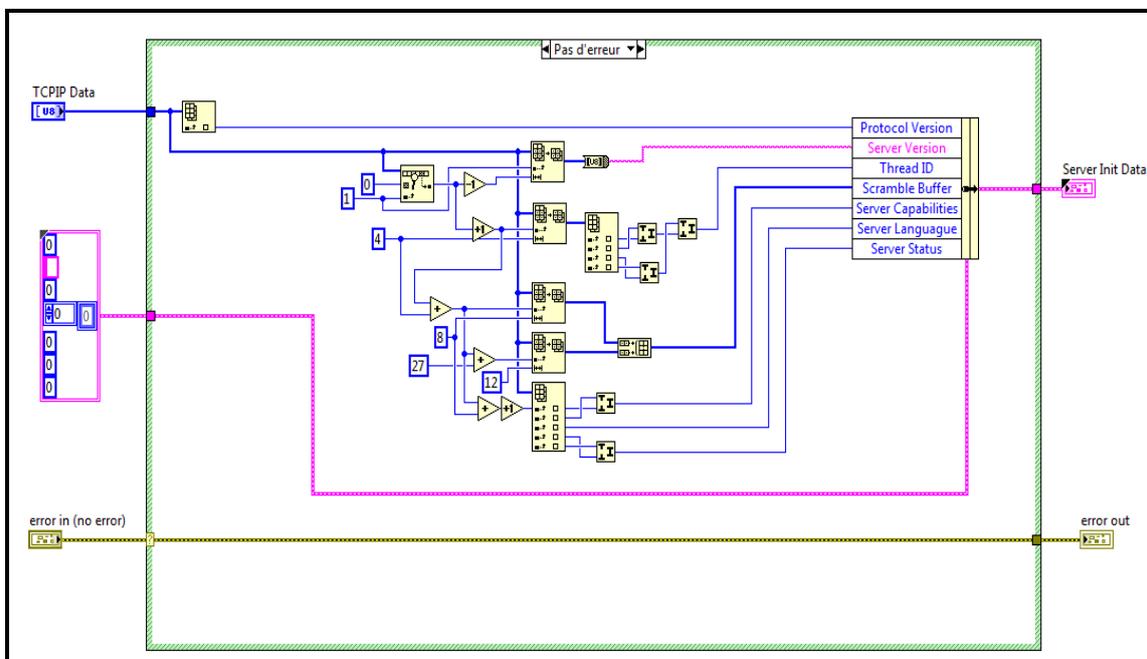


Figure C.4 Initialisation de Serveur

4. INITIALISATION DES DONNEES COTE CLIENT

L'opération d'initialisation de réception des données par le client, illustrée sur la figure C.5, requiert une authentification de la base de données, seul le mot de passe sera encrypté grâce à la fonction d'encryptage développée sous LABVIEW. En effet, le nom d'utilisateur et le mot de passe nécessaire pour accéder à la base de données sert à sécuriser les données stockées. Au niveau de cette étape, la capacité du client et la taille maximale du paquet reçu sont définies. Ces informations sont regroupées dans un cluster décrivant les caractéristiques des données relatives au client.

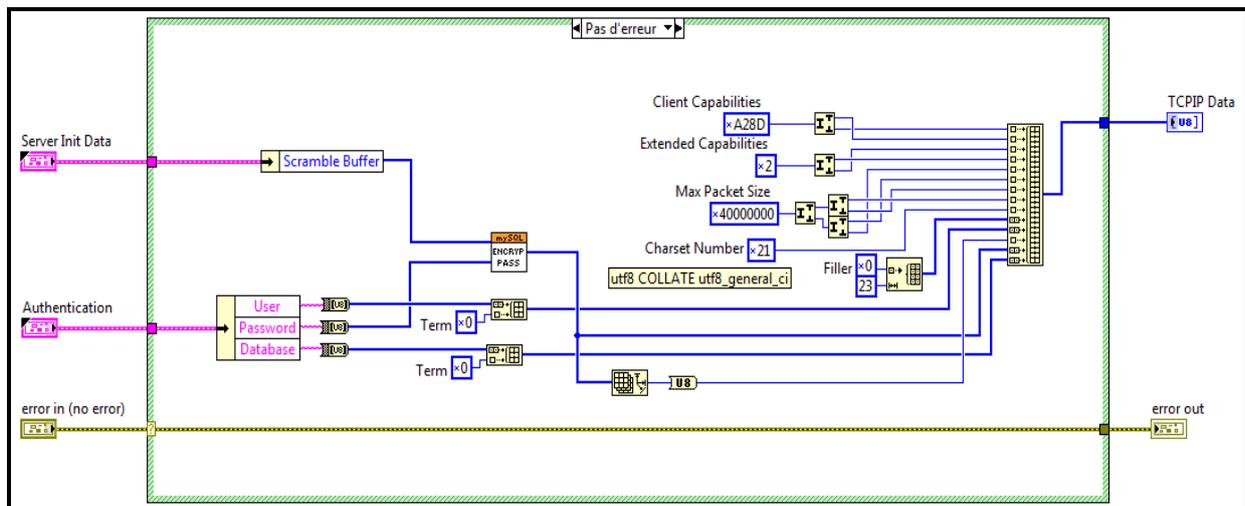


Figure C.5 Initialisation de client

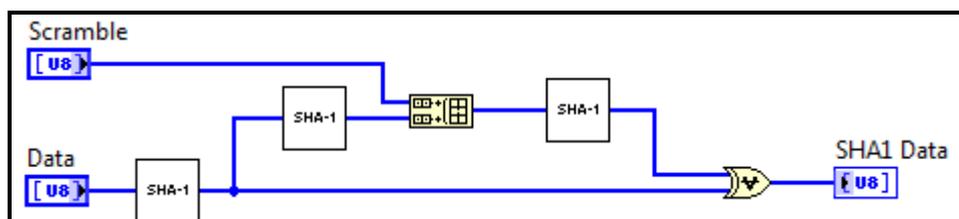


Figure C.6 Fonction d'encryptage

5. ENVOI DU PAQUET

L'envoi du paquet est assuré dans la direction de la connexion TCP (figure C.7). A la réception des données TCP/IP, la fonction « TCP écrire » crée un identificateur de connexion qui assure l'envoi des paquets.

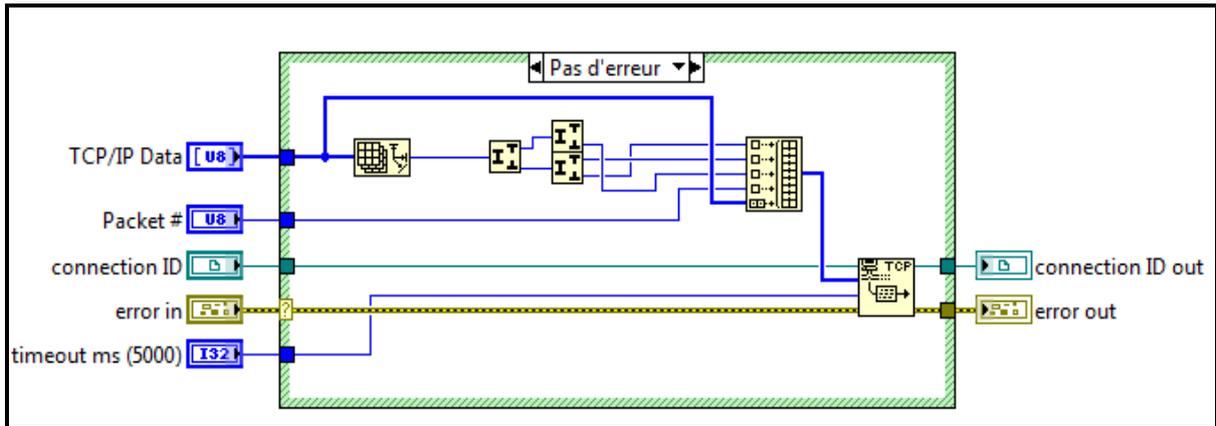


Figure C.7 Procédure d'envoi des paquets

6. CONTROLE DES PAQUETS

Cette opération permet de mieux garantir l'envoi du paquet elle est basée essentiellement sur l'utilisation de la fonction «Retun paquet » (figure C.8) qui sert à définir le cycle de vie des données. Cette fonction permet de :

- Extraire le type de paquet à partir de son premier élément
- Dégager le statut du paquet E/S
- Retourner l'ID des données

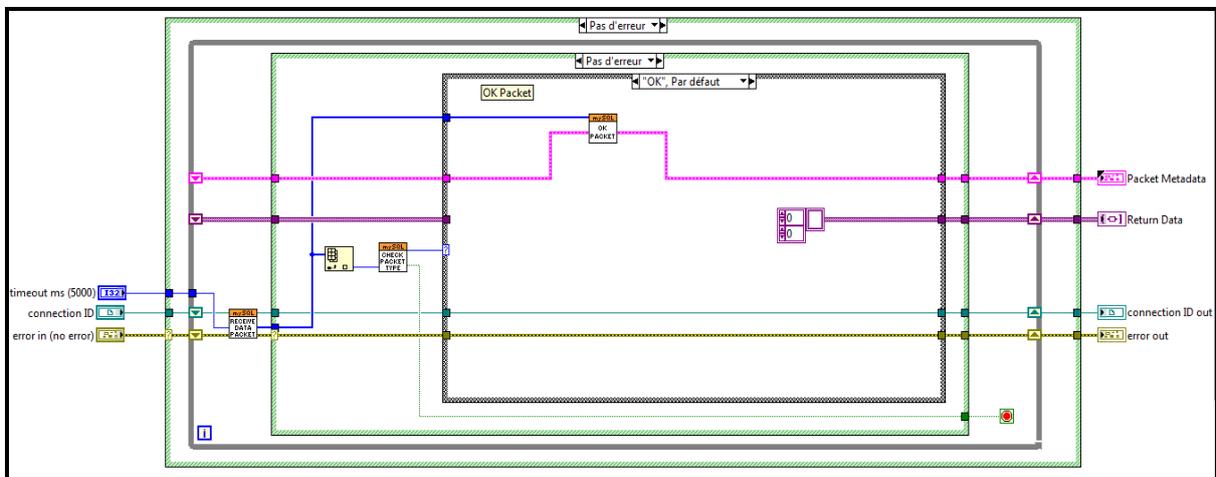


Figure C.8 Contrôle des paquets

7. RECUPERATION DES DONNEES

Une fois la connexion à la base est établie, une requête est envoyée à MySQL pour extraire les informations de l'accélération. En premier lieu, il récupère la requête à envoyer, ensuite, il la convertit sous la forme d'un tableau qui est envoyé grâce l'opération d'envoi

des paquets. Pour prendre tout ce qu'il y a dans la table de l'accélération, la requête est comme suit « SELECT * FROM tempmoi »

Les principales fonctions utilisées sont comme suit :

- **SELECT** : en langage SQL, le premier mot indique quel type d'opération doit effectuer MySQL ainsi la fonction Select demande permet à MySQL d'afficher le contenu d'une table.
- ***** : le paramètre qui suit SELECT permet d'indiquer quels champs MySQL doit récupérer dans la table. Cette petite étoile permet de prendre tous les champs du tableau.
- **FROM** : assurer la liaison entre le nom des champs et le nom de la table.
- **tempmoi** : correspond au nom de la table où il faut aller piocher.

A la réception du paquet, MySQL l'exécute et renvoie les informations qui le correspondent sous forme de requête. Ces données seront captées par la fonction « return packet »

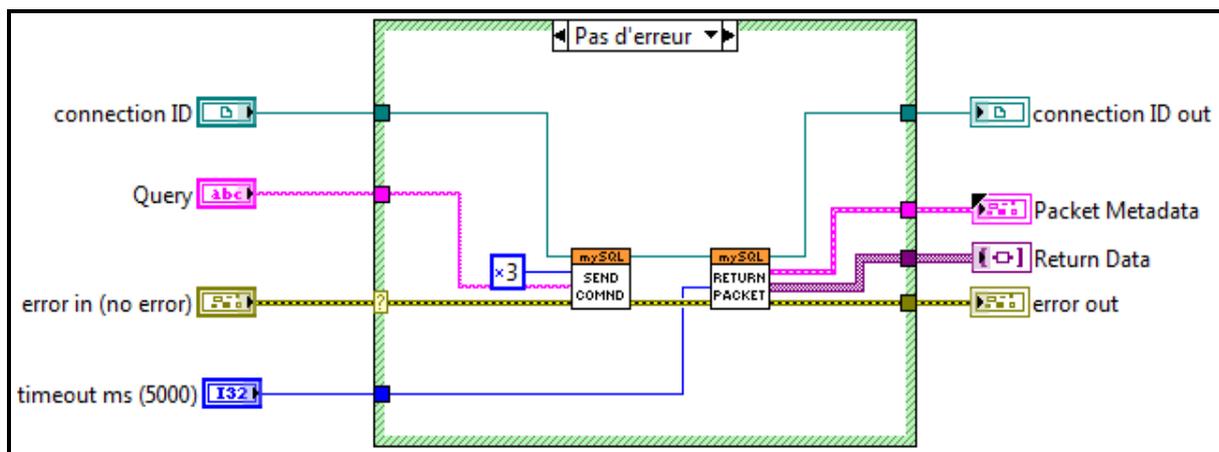


Figure C.9 Récupération des données

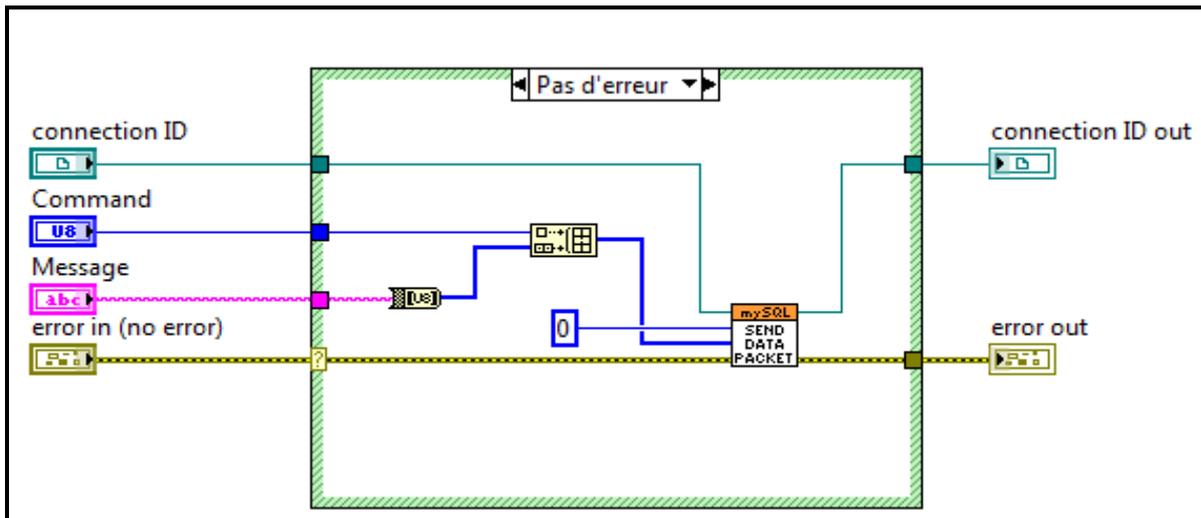


Figure C.10 Fonction d'envoi de requête

8. FERMETURE DE LA CONNEXION

Les connexions et les jeux de résultats ouverts de façon non persistente sont automatiquement détruits lorsqu'un script PHP termine son exécution. Aussi, le fait de fermer une connexion et libérer les résultats étant optionnel, le fait de le faire explicitement est néanmoins vivement recommandé. Ceci va retourner les ressources immédiatement à PHP et à MySQL, ce qui va améliorer les performances. De ce fait, la fonction « Close », illustrée dans la figure C.11, assure la fermeture de la connexion non persistante au serveur MySQL qui est associée à un identifiant spécifique. Si aucune connexion n'est trouvée ou n'est établie, une alerte de niveau **E_WARNING** est générée.

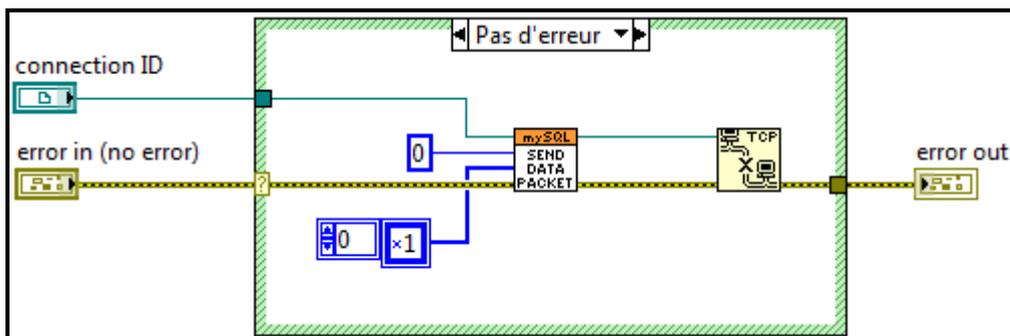
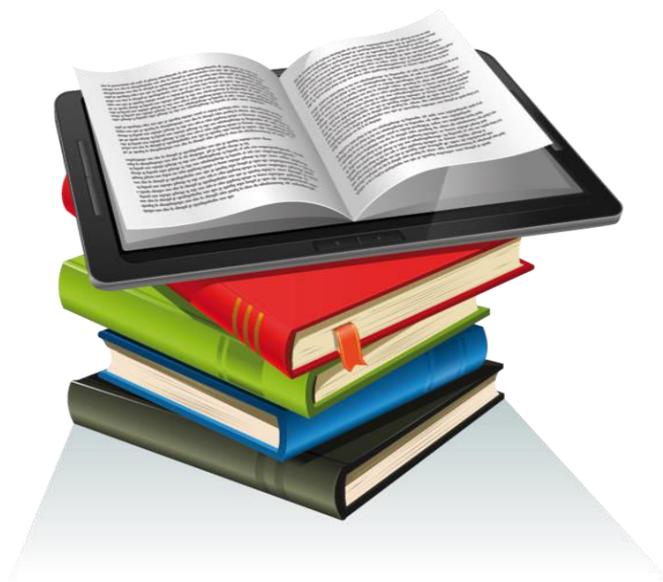


Figure C.11 Fermeture de connexion

RÉFÉRENCES



- [**ABD 05**] B. Abdelhadi, A. Benoudjit, and N. Nait-Said, "*Application of Genetic Algorithm With a Novel Adaptive Scheme for the Identification of Induction Machine Parameters* ", IEEE Transactions on Energy Conversion , TEC 05, Volume: 20, Issue: 2, pp 284 - 291, June 2005.
- [**ACH 12**] T. Achour, M. Pietrzak-David, "*An Experimental Test Bench for a Distributed Railway Traction Mechanical Load Emulator* ", 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society , IECON 2012, 25-28 Oct. 2012, Montreal ,Canada.
- [**AGO 10**] M. de Agostino, A. M. Manzano, M. Piras, "*Performance Comparison of Different MEMS-based IMUs*", Position Location and Navigation Symposium (PLANS), IEEE/ION , 4-6 May 2010 ,USA.
- [**AKA 15**] I. Akacha Helal, T-H.Vuong, N. Mrabet Bellaaj , J. David, M. Pietrzak-David, "*Reconstruction of MEMS accelerometer outputs in mobile fields by using Allan Variance*", IEEE ICMIC Conf. proceedings, 7th International Conference on Modelling, Identification and Control indexed by Ei Compendex, 18-20 December 2015, Sousse, Tunisia,.
- [**ALB 08**] A. Albarbar, S. Mekid, A. Starr, and R. Pietruszkiewicz, "*Suitability of MEMS accelerometers for condition monitoring: An experimental study* ", Sensors (Basel), Vol. 8, No. 2, pp. 784–799, 2008.
- [**ANG 07**] R.J. Ang, Y.K. Tan., S.K. Panda., "*Energy harvesting for autonomous wind sensor in remote area* ", 33rd Annual IEEE Conference of Industrial Electronics Society IECON'07, 05 - 08 Nov 2007, Taipei, Taiwan.
- [**BAG 10**] L. Baghli, J. F Pautex, S. Mezani , "*Wireless Instantaneous Torque Measurement Application to Induction Motors* ", Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference on, 6-8 Sept. 2010, Rome, Italie.
- [**BEN 14**] B. Benchoff "*New Chip Alert: The ESP8266 WiFi Module*", hackaday. Retrieved, 26 August 2014
- [**BIN 11**] A. Binder and R. Fachberger, "*Wireless SAW Temperature Sensor System for High-Speed High-Voltage Motors*", IEEE Sensors Journal, Vol: 11, Issue: 4, April 2011, pp. 966 - 970

- [BOE 10] J-R Boer , "*Capteurs MEMS : optimisation des méthodes de traitement capteurs, de navigation et d'hybridation* ", Thèse INPT, Toulouse, France, 2010.
- [BOS 01] Bimal K. Bose, "*Modern Power Electronics and AC Drives*", 2001, Library of Congress Cataloging in Publication Data.
- [BOU 16] M Bourogaoui, et al. "*Speed/position sensor fault tolerant control in adjustable speed drives-A review*", ISA Trans 64, 269-284. 2016 Jun 02. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isatra.2016.05.003i>
- [BRA 86] R. Bracewell , "*The Fourier Transform and its applications*", Published by McGraw-Hill Inc.,US , ISBN 10: 007007013X ISBN 13: 9780070070134
- [CAL 05] J. Mc.Call, "*Genetic algorithms for modelling and optimization*", Journal of Computational and Applied Mathematics 2005, pp 205–222
- [CLE 97] G. Clerc, D.R. Chouiter, C. Besson, N. Mrabet Bellaaj, J.M. Rétif, "*Comparative study of identification methods for induction machines*", Conference on Power Electronics and Applications EPE'97, September 1997, Trondheim, Norvège.
- [CHA 14] C. Saad, B. Mostafa, E-A Cheikh, H. Abderrahmane, "*Comparative Performance Analysis of Wireless Communication Protocols for Intelligent Sensors and Their Application*", International Journal of Advanced Computer Science and Applications, IJACSA 2014, Vol. 5.
- [CHE 10] M. Cheikh-Mhand, "*Etude du canal de propagation radio pour les systèmes embarqués sans fil automobile* ", Thèse de doctorat en Micro-Ondes, Electromagnétisme et Optoélectronique, Institut National Polytechnique de Toulouse, INPT, 2010.
- [CHON 03] C-Y Chong, S P. Kumar, "*Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges*", Proceedings of the IEEE, Vol 91, No 8, August 2003.
- [DAV 98] D. Eddy and D. Spanks, "*Application of MEMS Technology in Automotive Sensors and Actuators* ", 1998.
- [DES 06] M. Despalatovi, M. Jadri, B.Terzi, "*Identification of Induction Motor Parameters from Free Acceleration and Deceleration Test*", Automatika, Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, Vol.46 No.3-4 , 3–4, pp123–128 ,January 2006.
- [DON 08] W. Dong, P. Zanchetta and D. W.P. Thoma, "*Identification of Electrical Parameters in a Power Network Using Genetic Algorithms and Transient Measurements*",

Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th , 1-3 Sept. 2008, Poznan, Poland.

[DON 12] L. Dong; K. Zhang, "*Sensing and control of MEMS Accelerometers using Kalman filter* ", Control and Decision Conference (CCDC), 24th Chinese, 23-25 May 2012, Taiyuan, China.

[ELE 12] P. Eleftherios, P. Ioannis, M. Drakaki, "*Wireless Bluetooth Control Module for a DC Motor*", 2nd Pan-Hellenic Conference on Electronics and Telecommunications - PACET'12, 16-18 March 2012, Thessaloniki, Greece

[ELN 12] M. E. Elnady, J. K Sinha and S. O. Oyadiji, "*Condition monitoring of rotating machines using on-shaft vibration measurement*". In: Proceedings of the IMechE, 10th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, 11–13 September 2012, London, UK.

[EUG 05] E. Zakar, "*MEMS Piezo pressure sensor for military applications*", Proceedings for the Army Science Conference (24th), 29 November, 2005, Orlando, Florida

[FAI 95] A. Faisait. K. 1. Bradley, et G. M. Asher, "*Sensorless Speed et Detection of Inverter Fed Induction Motor Using Rotor Slot Harmonics and Fast Fourier Transform*", IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp 279-286, 1995.

[FER 98] A. Ferrah, K. J. Bradley, P J. Hogben-Laing, M.S. Woolfson, G. M. Asher, M. Sumner, J. Cilia, and J. Shuli, "*A speed identifier for induction motor drives using real-time adaptive digital filtering*", IEEE Transactions on Industry Applications , Vol. 34, No. 1, pp. 156-162, Jan. Feb. 1998

[FUR 11] H. Furtado, R. Trobec, "*Applications of wireless sensors in medicine*", IEEE MIPRO 2011, The 34th International Convention on Information and Communication, May 23-27, 2011, Opatija, Croatia

[GAB 05] S. R. I. Gabran, G. S. A. Shaker, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, "*Real-Time Power Quality Monitoring Using MEMS Based Wireless Current Sensors* ", Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, July 2005, Niagara Falls, Canada,

[GER 05] M. Gerin, "*Acquisition des données: la détection* ", Cahier Technique Schneider Electric n° 209; 2005

- [GOL 05] A. Goldsmith "*Wireless communications*", Cambridge, Cambridge University Press, 2005
- [HAL 12] M.Hatler, D.Gurganious, and C.Chi, "*Industrial wireless sensor networks. A market dynamics report*", (5th edition) ON World, 2012
- [HAI 09] J Hai, S. Ma, P. Du, "*Application of genetic algorithms in parameters identification of asynchronous motor*", Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics , SMC, October 2009, San Antonio, TX, USA
- [HUA 99] K. S. Huang, W. Kent, Q. H. Wu, D. R. Turner, "*Parameter Identification of An Induction Machine Using Genetic Algorithms*", Computer Aided Control System Design, Proceedings of the IEEE International Symposium on , pp 510-515, 27 Aug. 1999 ,Hawaii, USA.
- [HOU 12] L. Hou ; N.W. Bergmann, "*Novel Industrial Wireless Sensor Networks for Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis*", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement Volume: 61, Issue: 10, pp 2787 - 2798, Oct. 2012.
- [HOU 03] H. Hou and N. El-Sheimy, "*Inertial sensors errors modeling using Allan Variance*", in Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003), pp. 2860–2867, Sep. 2003 ,Portland, OR.
- [HEI 12] HEIDENHAIN, "*Systèmes de mesure pour entraînement électrique*", 2012.
- [HEL 15] I. Helal Akacha, T-H Vuong, N. Mrabet Bellaaj, J. David, M. Pietrzak-David, "*DC-servo motor velocities calculation by MEMS accelerometers*", ACECS Conf. proceedings, 2nd International Conference on Automation, Control Engineering and Computer Science, 22-25 March 2015,Sousse ,Tunisia.
- [IOR 10] M. Iorgulescu, R. Beloiu, M. Octavian Popescu , "*Vibration Monitoring for Diagnosis of Electrical Equipment's Faults*", 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, pp 493-499, May 2010 .
- [JAA 13] A. Jaafar, B. Sareni, X. Roboam, "*A systemic Approach integrating driving cycle for the design of hybrid locomotives*", IEEE Transaction on vehicular technology, Vol 62, No.8, October 2013.

- [JIN 09] H.Jin, S.Ma; P.Du, "*Application of genetic algorithms in parameters identification of asynchronous motor*", IEEE international conference on, Systems, Man and Cybernetics, 2009. SMC 2009. IEEE International Conference on, 11-14 Oct. 2009, San Antonio, U.S.A
- [JED 99] J. Pedersen, B. Andersen, "*Handset Antennas for Mobile Communication: Integration, Diversity and Performance*", Review of Radio Science 1996-1999, August 1999, pp. 119-123
- [JOV 07] M.R Jovanovic, B. Bamieh, "*Architecture Induced by Distributed Backstepping Design*", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol 52, Issue 1, pp. 108 – 113, January 2007.
- [JUD 01] J.W Judy, "*Micro electromechanical systems (MEMS): fabrication, design and applications*", Smart Materials and Structures, Vol10, Num6, Published 26 November 2001
- [KOR 10] S. Korkua ; H.Jain, ; L. Wei-Jen ; K. Chiman., "*Wireless health monitoring system for vibration detection of induction motors* ", IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS) , 9-13 May 2010 , Florida State University, Tallahassee, FL, USA
- [KAM 09] K. Kampsios, P. Zanchetta, C. Gerada and A. Trentin, "*Identification of Induction Machine Electrical Parameters using Genetic Algorithms Optimization*", Industry Applications Society Annual Meeting, IAS '08. IEEE, 5-9 Oct. 2008, Alberta, Canada.
- [LAW 93] A. Lawrence, "*Modern Inertial Technology Navigation Guidance and Control*" Springer-Verlag, New York, 1993.
- [LEE 92]T. K. Lee, S. B, Cho, and D. Hyun, "*Sensorless Vector Control of Induction Motor Compensating the Variation of Rotor Resistance*", Proceedings of the International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, Power Electronics and Motion Control. , pp. 72-76, 13, Nov, 1992.
- [LEE 82] W.C.Y.Lee, "*Mobile Communications Engineering*", Book Mobile Communications Engineering, Mc Graw-Hill Professional ©1982, ISBN: 0070370397
- [LEO 85]W. Leonard, "*Control of Electrical Drives*", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, Hardcover ISBN 978-3-540-41820-7, 2001
- [LEN 08] Y. Leng, Y. Pan , Q. Li, S. Liu, " *Analysis of Electromagnetic Wave Propagation Characteristics in Rotating Environments*", Electronic Packaging Technology & High Density

Packaging, ICEPT-HDP. International Conference on, 28-31 July 2008, Shanghai. Country, China

[LIU 06] L. Suyi, W. Shuqing, "*Machine Health Monitoring and Prognostication via Vibration Information*", Proceedings of the sixth international Conference on Intelligent systems design and applications, Vol.1, pp 879-886, October 2006

[LU 09] B. Lu, and V. C. Gungor, "*Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks*". IEEE Transactions on Industrial Electronics , Vol 56, Issue: 11, pp 4651 - 4659, Nov. 2009.

[LU 05] Bin Lu, Long Wu, Thomas G. Habetler , Ronald G. Harley , and José A. Gutiérrez, "*On the Application of Wireless Sensor Networks in Condition Monitoring and Energy Usage Evaluation for Electric Machines*", 31 St Annual IEEE Industrial Electronics Society, IECON, 6-10 Nov. 2005 , Raleigh, NC, USA

[LYV 02] S. E. Lyshevski, "*MEMS and NEMS: systems, devices and structures*", January 18, 2002 by CRC Press, ISBN 9780849312625 - CAT# 1262

[MAR 05] G. S Maruthi ; K. Panduranga Vittal , "*Electrical Fault Detection in Three Phase Squirrel Cage Induction Motor by Vibration Analysis using MEMS Accelerometer*", IEEE International Conference on Power Electronics and Drives Systems , Vol 2, 28-01 Nov. 2005, pp 838 - 843

[MAR 16] G.S. Maruthi. and V. Hegde, "*Application of MEMS Accelerometer for Detection and Diagnosis of Multiple Faults in the Roller Element Bearings of Three Phase Induction Motor*", IEEE Sensors Journal , Vol 16, Issue: 1, , pp 145 – 152, Jan.1, 2016.

[MEL 10] M. Erol-Kantarci; H.T. Mouftah "*TOU-Energy Management and Wireless Sensor Networks for Reducing Peak Load in Smart Grids*", Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd, 6-9 Sept. 2010.

[MRA 99] N. Mrabet Bellaaj, K. Jelassi, "*Evaluation by simulation of inverter fed induction motor drives behaviour*", *Proc. IEEE Symp. Electrical Machines Power Electronics and Drives (SDEMPED'99)*, September 1999, pp. 447-451.

[MRA 01] N. Mrabet Bellaaj, "*Contribution à l'identification et à la commande numériques de la machine asynchrone: Algorithmes Génétiques, Réseaux de Neurones et Logique Floue*", Thèse de doctorat de l'Ecole National d'Ingénieurs de Tunis, 2001

- [**MOO 04**] Moog components Group, "Synchro and resolver engineering handbook", 2004. 2004, Moog Components Group Inc. MSG90020 12/04 www.moog.com
- [**MUS 95**] A. Muszynska, "*Vibrational Diagnostics of Rotating Machinery Malfunctions*", International Journal of Rotating Machinery, Vol1 Issue 3-4, pp 237-266, 1995.
- [**NAK 88**] H.Nakano, I.Takahashi, "*Sensorless Field Oriented Control of an Induction Motor Using an Instantaneous Slip frequency Estimation Method*", IEEE Power Specialists Conference, pp. 847-854, 1988.
- [**NIS 11**] V. Niskanen , J. Ahola, "*Implementing clamp on wireless torque measurement system for rotating shaft applications (UI)* ", Power Electronics and Applications , EPE 2011, Proceedings of the 2011-14th European Conference on, 30 Aug.-1 Sept. 2011, Birmingham, United Kingdom.
- [**OND 13**] O. Karpis, "*Wireless Sensor Networks in Intelligent Transportation Systems*", International Journal of Modern Engineering Research (IJMER), Vol.3, Issue.2, March-April. 2013, pp-611-617,
- [**PED 10**] J. Pedro Amaro, F. J. T. E. Ferreira; R.Cortês, " *Low Cost Wireless Sensor Network for In-Field Operation Monitoring of Induction Motors* ", Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on, pp. 1044 - 1049, 14-17 March 2010 , Vi a del Mar, Chile
- [**PEJ 12**] M. Pejanović Đurišić, Z. Tafa, G. Dimić, "A survey of military applications of wireless sensor networks", Embedded Computing (MECO), 2012 Mediterranean Conference on, 19-21 June 2012, Montenegro.
- [**PER 09**] Perrone and A. Vallan, "*A low-cost optical sensor for noncontact vibration measurements*", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 5, pp. 1650–1656, 2009.
- [**PEN 94**] P. F.Z.Fukao T., " *Robust speed identification for speed sensorless vector control of induction motors*", IEEE Transactions on industry applications, vol. 30, no. 5, pp. 1234-1240, 1994.
- [**PRO 93**] F. Profumo ; G. Griva ; M. Pastorelli ; J. Moreira., "*Universal Field Oriented Controller With Indirect Speed Sensing Based on the Saturation Third Harmonic Voltage*", Power Electronics Specialists Conference, 1993. PESC '93 Record, 24th Annual IEEE , 20-24 June 1993.

[QIN12] W. Qingmin ; L. Yuhong ; S. Mubiao ; Y. Yaoen , "Study on application of MEMS sensor in monitoring the state of vehicle transportation", World Automation Congress (WAC), 2012, 24-28 June 2012 , Puerto Vallarta, Mexico.

[RAH 02] F. Rahmatian, ; N.A.F. Jaeger , " High accuracy optical electric field and voltage sensors", Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. Ofs 2002, 15th, 10-12 May 2002.

[RAH 10] M. Rahman, T. Azam, S. K. Saha, "Motor Fault Detection Using Vibration Patterns", Electrical and Computer Engineering (ICECE), International Conference on, 18-20 December 2010, Dhaka, Bangladesh

[RAL 75] Ralph O. Eis, "Electric Motor Vibration- Cause, Prevention and Cure", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol IA-11, Issue No. 3, pp 267-275, May 1975

[RAS 11] H.F. Rashag, S. P. Koh, S. K. Tiong, K. H, "Investigation of induction motor parameter identification using particle swarm optimization-based RBF neural network", International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(19), pp. 4564-4570, 16 September, 2011

[REZ 15] M. Rezazadeh Mehrjou, N. Mariun, M.Karami ,N. Misron , M. Amran, M.Radzi , "Wireless Sensors System for Broken Rotor bar Fault Monitoring using Wavelet Analysis ", 4th International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications 2015 (ICEDSA) IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 99 .

[ROS 07] N. S Rosa; P. Roberto and F. Cunha, " Behavioral Specification of Wireless Sensor Network Applications", Global Information Infrastructure Symposium, GIIS 2007. First International, 2-6 July 2007, Marrakech - Morocco

[SAL 09] F. Salvadori, M. de Campos, P. S. Sausen, R. F. de Camargo, C. Gehrke, C. Rech, M. A. Spohn, and A. C. Oliveira, " Monitoring in industrial systems using wireless sensor network with dynamic power management", IEEE Trans. Instrum. Meas, vol. 58, no. 9, pp. 3104–3111, Sep. 2009.

[SAS 10] H. Sasaki K. Ueda , "Design and Deployment of Wireless Monitoring System for 4-20mA Current Loop Sensors", Networked Sensing Systems, 2007. INSS'07. Fourth International Conference on, 6-8 June 2007, Brainschweig, Germany.

[SCH 04] M.Schwartz., "Mobile wireless Communications theory and Techniques", CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, ISBN-13 978-0-511-26423-8,2004,

[SEB 09] J.P Sebastia, J.A. Lluch, J.R. Vizcaino and J.S. Bellon, " Vibration Detector Based on GMR Sensors", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 58, No.3, 2009, pp 707-712.

- [SHI 02] K. L. Shi, T. F. Chan, Y. K. Wong, S. L. Ho, "*Speed estimation of an induction motor drive using extended Kalman filter*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, , Vol. 49, No. 1, February 2002
- [SHI 07] G. Shi ; C-S Chan ; G Zhang ; W J. Li ; P H. W. Leong ; K-S Leung , "*Towards a mobile airbag system using MEMS sensors and embedded intelligence* ", Robotics and Biomimetics, 2007. ROBIO 2007. IEEE International Conference on , 15-18 Dec. 2007 , pp 634 - 639 , Sanya, China
- [SHE 04] El-Sheimy, N.; Nassar, S.; Schwarz, K.P.; Noureldin, "A. *Modeling inertial sensor errors using autoregressive (AR) models*". Navigation journals, December 2004, Vol 51, Issue 4, Winter 2004, pp 259–268.
- [SIN 13] J. K Sinha and K. Elbhah, "*A future possibility of vibration based condition monitoring of rotating machines*", Mechanical Systems and Signal Processing journal , Elsevier Ltd, Vol 34, pp 231–241, 2013.
- [SUB 14] S.B. Chaudhury, M. Sengupta , K. Mukherjee, " *Vibration Monitoring of Rotating Machines Using MEMS Accelerometer* " , International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)): 2347-3878, Vol2 , Issue 9, September 2014 .
- [SUD 10] S.K. Mazumder, R. Huang and K. Acharya, "*Rotor Position Feedback Over an RF Link for Motor Speed Control*", IEEE Trans on Power Electronics, Vol. 25, No. 4, April 2010
- [TAM 87] S.Tamai, H. Sugimoto, M. Yano, "*Speed sensorless vector control of induction machine with model reference adaptive system*", Proceeding of IEEE-IAS 1987 Annual Meeting, pp. 189-195, Oct. 1987
- [TAN 05] M. Tanaka, "*An industrial and applied review of new MEMS devices features*", Proceedings of the 32nd International Conference on Micro- and Nano-Engineering Microelectronic Engineering, Volume 84, Issues 5–8, May–August 2007, pp 1341–1344
- [TSY 11] M Tsytkin, "*Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique- A Practical Implementation*", IEEE International Electric Machines & Drives Conference, pp 406-411, May 2011, Ontario, Canada.
- [TUR 08] J.Turkka, M. Renfors, "*Path loss measurements for a non-line-of sight mobile-to-mobile environment*" ITS Telecommunications, ITST 2008. 8th International Conference on, pp.274-278, 24Oct. 2008, Phuket, Thailand

[VAG 12] Vagner, M. Benes, P. ; Havranek, Z. “*Experience with Allan variance method for MEMS gyroscope performance characterization*” , IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference I2MTC , pp1343 – 1347, 13-16 May 2012 , Graz, Austria.

[VAS 97] P. Vas, W. Drury et A. F. Stronach , "*Present and Future of Drives, Sensorless and Artificial Intelligence Applications*", European Power Electronics And Drives Association, EPE, pp. 4.573-4.578,1997.

[VIN 13] P. R. Vineetha ; K. Natarajan ; T. G. Girikumar , “*Induction motor fault detection and diagnosis by vibration analysis using MEMS accelerometer*”, IEEE Emerging Trends in Communication, Control, Signal Processing & Computing Applications (C2SPCA), 2013 International Conference on, 10-11 Oct. 2013, Bangalore, India

[WOO 03] K. Jong-Wook, K. Su Jin, K. Sang Woo, "*Parameter identification of induction motors using dynamic encoding algorithms for searches (DEAS)*", Industrial Electronics Society, IECON '03. The 29th Annual Conference of the IEEE, VOL. 20, NO. 1, 2-6 Nov. 2003, Virginia, USA

[WOL 04] Th.M. Wolbank ; J.L. Machl ; Th. Jager , "*Combination of signal injection and neural networks for sensorless control of inverter fed induction machines*", Power Electronics Specialists Conference, PESC 04. IEEE 35th Annual, pp. 2300-2305, 20-25 June 2004, Aachen Germany

[XIN 08] Z. Xin, Y. Li, P. Mumford and C. Rizos, "*Allan variance analysis on error characters of MEMS inertial sensors for an FPGA-based GPS/INS system*", International Symposium on GPS/GNSS 08, pp. 127133, November 2008 , Yokohama, Japan.

[XUE 07] X. Xue; V. Sundararajan; W.P. Brithinee, “*The application of Wireless sensor network for condition monitoring in three phase IM*”, Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 22-24 Oct. 2007, Nashville, TN, USA

[ZAK 05] E. Zakar, “*MEMS Piezo pressure sensor for military applications*” *Proceedings for the Army Science Conference (24th)*, 29 November, 2005, Orlando, Florida

[ZEI 99] I. Zein, L. Loron, "*A second-order model for the real-time identification of the induction motor*", The 6th International Conference Modelling and Simulation of Electric Machines, Converters and Systems , ELECTRIMACS'99 14-16 September 1999, Lisboa, Portugal .

Liens

[1] <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/83692/AD/ADXL203.htm>

[1] http://iut-tice.ujf-grenoble.fr/tice-espaces/MPH/EP_gallotLava/wupload/File/Capteurs/TP1

[3] Ca-BIBLIO-2010-10-09.pdf

[4] <http://www.ti.com/tool/msp-exp430fr5739>

[5] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc3000.pdf>

[6] SENSEI. Integrating the physical with the digital world of the network of the future.

:<http://www.sensei-project.eu/>.