



**HAL**  
open science

# E-diagnostic de processus physiques à base des méthodes de haute résolution Application : machines éoliennes

Saad Chakkor

## ► To cite this version:

Saad Chakkor. E-diagnostic de processus physiques à base des méthodes de haute résolution Application : machines éoliennes. Instrumentations et Détecteurs [physics.ins-det]. Faculté des Sciences de Tétouan, Maroc, 2015. Français. NNT : 474 . tel-01216236

**HAL Id: tel-01216236**

**<https://inria.hal.science/tel-01216236>**

Submitted on 15 Oct 2015

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

المملكة المغربية



Royaume du Maroc



Ministère de l'Enseignement Supérieur  
Université Abdelmalek Essaâdi  
Faculté des Sciences -Tétouan



N° d'ordre : 474

## Thèse de Doctorat

Présentée Par :

**Saad Chakkor**

Discipline : Physique

Spécialité : Automatique et Télécommunications

Sujet de la thèse :

# «E-diagnostic de processus physiques à base des méthodes de haute résolution Application : machines éoliennes»

Soutenue le 22 Juillet 2015, devant le jury suivant :

Professeur El Moussaoui Ahmed	Vice président de l'UAE, Tétouan, Président
Professeur Hajraoui Abderrahmane	Faculté des Sciences, Tétouan, Directeur de thèse
Professeur Amami Benaissa	Faculté des Sciences et Techniques, Tanger, Rapporteur
Professeur Drissi Lahsini Hilal	Ecole Supérieure de Technologie, Salé, Rapporteur
Professeur Setti Larbi	Faculté Polydisciplinaire, Larache, Rapporteur
Professeur El Hibaoui Abdelaaziz	Faculté des Sciences, Tétouan, Examineur
Professeur Aghzout Otman	Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Tétouan, Examineur
Professeur Khamlichi Abdellatif	Ecole Nationale des Sciences Appliquées, Tétouan, Examineur

المملكة المغربية



Kingdom of Morocco



Ministry of Higher Education  
University of Abdelmalek Essaâdi  
Faculty of Sciences -Tetouan



Order Number : 474

## Doctoral Thesis

Presented by :

**Saad Chakkor**

Discipline : Physics

Speciality : Automatic and Telecommunications

Thesis title :

# «E-diagnosis of physical processes based on high resolution methods Application : Wind turbine machines»

Defended 22 July 2015, in front of the following jury :

Professor El Moussaoui Ahmed  
Professor Hajraoui Abderrahmane  
Professor Amami Benaissa  
Professor Drissi Lahsini Hilal  
Professor Setti Larbi  
Professor El Hibaoui Abdelaaziz  
Professor Aghzout Otman  
Professor Khamlichi Abdellatif

Vice president of U.A.E, Tetouan, President  
Faculty of Sciences, Tetouan, Thesis Director  
Faculty of Sciences and Techniques, Tangier, Reviewer  
Superior School of Technology, Salé, Reviewer  
Polydisciplinary Faculty, Larache, Reviewer  
Faculty of Sciences, Tetouan, Examiner  
National School of Applied Sciences, Tetouan, Examiner  
National School of Applied Sciences, Tetouan, Examiner

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

«وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا»

سورة طه الآية 114

## Résumé :

L'expansion des systèmes utilisant des capteurs intelligents a incité l'étude d'E-diagnostic de processus physiques à base des méthodes de haute résolution. Le contrôle automatisé des machines éoliennes modernes nécessite la maintenance proactive. On a proposé plusieurs indicateurs mesurant le niveau de performance d'un protocole d'acheminement sans fil des paquets de données vers la station de supervision. Une étude de conception d'un système de diagnostic IESRCM permettant la surveillance locale ou à distance des machines indiquées est réalisée. Une comparaison a été effectuée pour apprécier les performances de ce système lors de son intégration avec les modules sans fil GPRS ou Wi-Max. Les résultats obtenus avec simulation sous Proteus ISIS et OPNET ont favorisé l'incorporation du module Wi-Max dans le système proposé en raison de ses avantages par rapport au GPRS. Les méthodes d'estimation spectrale à haute résolution sont efficacement utilisées pour la détection de défauts électromécaniques d'éoliennes. Devant la diversité de ces méthodes, une investigation de chaque algorithme à part est réalisée avec un signal composite du courant statorique contenant plusieurs types de défauts et sous un environnement différemment bruité. On a déduit à cet égard que la précision de l'estimation spectrale dépend du degré de perturbation du signal, du niveau de sévérité d'un défaut, de la fréquence d'échantillonnage et du nombre d'échantillons de données. La comparaison avec simulation sous Matlab qu'on a effectuée entre ces algorithmes a prouvé la supériorité de l'algorithme ESPRIT. Cependant, cet algorithme présente un temps de calcul relativement grand et demande une taille mémoire importante pour être exécuté. Pour contourner cet obstacle, on a proposé une amélioration de la technique ESPRIT-TLS pour la rendre applicable en temps réel. Une nouvelle version est développée dans cette thèse intitulée Fast-ESPRIT. L'élaboration envisagée est effectuée en combinant la technique de filtrage passe bande récursif IIR de Yule-Walker et la technique de décimation. L'évaluation de la technique proposée dans la détection de quatre types de défauts d'une éolienne est réalisée. L'analyse des résultats obtenus confirme que l'algorithme Fast-ESPRIT offre une précision spectrale très satisfaisante dans la discrimination des harmoniques des défauts étudiés. On a abouti à une complexité réduite avec un rapport admissible, à une réduction de l'espace mémoire requis pour son exécution 5 fois inférieur et à la diminution du temps de calcul d'environ 14,25 fois moins. Cette méthode offre une meilleure résolution même en présence d'un nombre important d'harmoniques de défauts différents. Cependant, cette nouvelle méthode présente quelques limitations puisqu'elle ne permet pas de reconnaître le type et le niveau de sévérité d'un défaut détecté. On a donc proposé une autre approche de contrôle en temps réel. Celle-ci combine la méthode Fast-ESPRIT développée, l'algorithme de classification de défauts intitulé CAFH et un système d'inférence flou interconnecté aux capteurs de vibration localisés sur les différentes composantes d'éolienne. Un nouvel indicateur du niveau de sévérité de chaque type de défaut a été formulé. Il permet d'éviter les alarmes inutiles. La simulation sous Matlab de cette approche avec quatre types de défaillances en présence d'un bruit montre qu'elle offre une meilleure robustesse dans la classification des défauts.

**Mots clés :** Diagnostic, Systèmes Embarqués, Energie éolienne, Traitement du signal, Estimation Spectrale à Haute Résolution, Télésurveillance, Capteur intelligent, Contrôle, Temps réel, Communication sans fil, Routage, Protocoles, Maintenance, Logique Floue, Classification, Microcontrôleur, Simulation.

## Abstract :

The expansion of systems using intelligent sensors has prompted the study of physical processes E-diagnosis based on high resolution methods. The automated control of modern wind machines requires proactive maintenance. We proposed several indicators measuring the performance level of a wireless protocol for routing data packets to the monitoring station. A study to design a diagnosis system entitled IESRCM for local or remote monitoring for the mentioned machines is achieved. A comparison has been realized to appreciate the performance of this system when it is integrated with GPRS or Wi-Max wireless modules. The obtained results by simulation using Proteus ISIS and OPNET software have favored the incorporation of Wi-Max module in the proposed system because its advantages over GPRS. The high resolution spectral estimation methods are effectively used for detecting electromechanical wind turbine faults. In front of the diversity of these methods, an investigation of each algorithm separately has been performed with a composite signal of stator current containing several types of defects and under different noisy environments. It was deduced in therein that the accuracy of the spectral estimation depends on the degree of the signal disturbance, the severity level of the faults, the frequency sampling and the number of data samples. The comparison with simulation in Matlab that we have made between these algorithms has proved the superiority of ESPRIT algorithm. However, this algorithm has a relatively large computing time and requires an important memory size to be executed. To overcome this problem, an improvement of ESPRIT-TLS technique has been proposed to make it applicable in real time. A new version of this method is developed in this thesis entitled Fast-ESPRIT. The proposed development is made by combining pass band recursive filtering technique IIR of Yule-Walker and decimation technique. The evaluation of the proposed technique for wind turbine fault detection of various types is performed. The analysis of the obtained results confirms that the Fast-ESPRIT algorithm provides a very satisfactory spectral accuracy in discriminating the studied faults harmonics. It resulted in a reduced complexity with an eligible ratio, a reduction of the required memory size for its implementation 5 times lower and a decrease of calculation time about 14,25 times less. This method provides better spectral resolution even in presence of a significant number of harmonics of different faults. However, this new method has some limitations because it does not recognize the type and the severity level of a detected fault. Therefore, another real time control approach has been proposed. It combines the developed Fast-ESPRIT method, the fault classification algorithm called CAFH and a fuzzy inference system interconnected with vibration sensors located on various wind turbine components. A new indicator of severity level for each studied fault type was formulated. It allows avoiding unnecessary alarms. Matlab simulation of this approach under four failure types with a noise shows that it provides a good robustness of faults classification.

**Keywords :** Diagnosis, Embedded systems, Wind power, Signal processing, Spectral estimation, High Resolution, Remote monitoring, Intelligent sensors, Control, Real time, Wireless communication, Routing, Protocols, Maintenance, Fuzzy logic, Fault classification, Microcontroller, Simulation.

# Remerciements

Je remercie d'abord le bon dieu tout puissant d'avoir terminer ce modeste travail.

Je présente mes sincères remerciements à mon directeur de thèse monsieur le professeur Abderrahmane Hajraoui d'avoir dirigé cette thèse et pour ses efforts qu'il m'a accordé, lors de mon encadrement. Il n'a cessé de me prodiguer généreusement tant de conseils, de directives, d'orientations et de suggestions. Je le remercie pour son aide efficace et précieuse tout au long de ce travail de recherche, pour sa disponibilité ainsi que pour sa patience, de me faire confiance, pour ses encouragements et pour la qualité de l'encadrement qu'il m'a assuré durant tous les travaux que j'ai réalisé avec lui. Je suis honoré de l'intérêt qu'il a toujours manifesté pour mes travaux.

Il m'est agréable d'exprimer également ma profonde gratitude à monsieur le professeur El Moussaoui Ahmed vice président de l'Université Abdelmalek Essaâdi d'avoir accepté d'être le président du jury de cette thèse. Il m'a fait l'honneur par sa présence.

Je tiens à remercier vivement mon cher professeur monsieur Benaissa Amami de la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger qui a bien voulu être rapporteur de cette thèse. Je lui en suis très reconnaissant de participer au jury de ma soutenance. Il m'a fait l'honneur par sa présence.

Mes reconnaissances vont également à mon cher professeur monsieur Hilal Drissi Lahsini de l'Ecole Supérieure de Technologie de Salé d'avoir accepté être rapporteur de cette thèse. Il m'a fait un grand honneur de bien vouloir siéger dans le jury de ce travail.

Je présente mes vifs remerciements les plus sincères à monsieur le professeur Setti Larbi, du département de physique de la Faculté polydisciplinaire de Larache d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse. Je l'en remercie sincèrement.

C'est avec un grand plaisir que je retrouve dans ce jury de thèse monsieur le professeur El Hibaoui Abdelaaziz de la Faculté des Sciences de Tétouan. Je le remercie sincèrement d'avoir accepté d'être examinateur de cette thèse.

A monsieur le professeur Aghzout Ottman de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Tétouan, je tiens à lui exprimer ma profonde gratitude pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être examinateur de ce travail. Je le remercie vivement.

Je tiens à exprimer mes remerciements à monsieur le professeur Khamlichi Abdellatif de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Tétouan de m'avoir fait l'honneur d'être dans mon jury de thèse. Je le remercie infiniment pour son aide illimitée et pour ses remarques constructives.

Je remercie tous les professeurs indiqués pour le temps précieux qu'ils m'ont réservé pour leur lecture, leurs remarques et leurs interrogations améliorant la qualité de ce travail.

Mes remerciements et mes respects les plus distingués à tous les responsables du CED « Sciences et Technologies » de la Faculté des Sciences de Tétouan. Mes vifs remerciements à mes collègues du laboratoire systèmes de communication et de détection Mostafa Baghoury et El Ahmadi Cheikh pour leur collaboration et leur soutien.

Mes remerciements les plus sincères à monsieur le professeur Hassan Chatt, enseignant de la langue française au lycée Abi Abass Essebti de Tanger, d'avoir accepté de me corriger linguistiquement le texte de cette thèse.

Je n'oublie personne qui a participé dans ce travail de près ou de loin.

Saad Chakkor

# Dédicace

*À la mémoire de mon cher père le professeur Mostafa Chakkor,*

*Je dédie ce travail à mes parents, à mon épouse Hayat, à tous les membres de ma famille et toutes les personnes qui ont contribué à travers leur soutien moral ou matériel.*

Saad Chakkor

# Table des matières

---

<b>Remerciements</b> .....	i
<b>dédicace</b> .....	iii
<b>Table des matières</b> .....	iv
<b>Liste des figures</b> .....	vii
<b>Liste des tableaux</b> .....	x
<b>Liste des acronymes</b> .....	xii
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre I :</b>	
<b>Systèmes à base de capteurs intelligents et leurs applications</b>	
I. Structure d'un capteur intelligent .....	8
II. Avantages de l'intelligence d'un capteur .....	11
III. Classification des capteurs intelligents .....	12
III.1 Capteurs actifs.....	13
III.2 Capteurs passifs.....	13
IV. Topologies des capteurs intelligents sans fil .....	14
IV.1 Capteurs intelligents autonomes.....	14
IV.2 Réseau de capteurs intelligents.....	15
V. Standards et protocoles de communication.....	17
V.1 Protocoles de communication.....	18
V.1.1 Protocoles MAC.....	18
V.1.2 Protocoles de routage.....	19
V.2 Standards de communication.....	20
V.3 Métriques de performance .....	21
VI. Limitations et les défis.....	22
<b>Chapitre II :</b>	
<b>Analyse comparative de performances des protocoles de communication sans fil</b>	
I. Problématique de la performance des protocoles .....	27
II. Nouvelles contraintes des systèmes de capteurs intelligents .....	30
II.1 Influence de la topologie .....	30
II.2 Impact de la hiérarchie du réseau .....	32
II.3 Impact du modèle de données .....	33
II.4 Impact de la sécurité .....	34
III. Communication sans fil .....	34

III.1 Bluetooth IEEE 802.15.1.....	38
III.2 UWB IEEE 802.15.3 .....	39
III.3 ZigBee IEEE 802.15.4 .....	39
III .4 ZigBee IP IEEE 802.15.4 basé sur IPv6 .....	42
III .5 Wi-Fi IEEE 802.11a/b/g .....	43
III .6 Wi-Max IEEE 802.16 .....	45
III .7 Technologie GSM/GPRS 850-900DCS/PCS .....	46
IV. Indicateurs de performance d'un protocole avec simulation.....	48
IV.1 Taille du réseau .....	48
IV.2 Temps de transmission .....	49
IV.3 Puissance de transmission et la portée .....	50
IV.4 Consommation d'énergie .....	51
IV.5 Débit en temps réel .....	56
IV.6 Taux d'erreur binaire B.E.R.....	58
IV.7 Efficacité du codage des données .....	60
IV.8 Efficacité énergétique de microcontrôleur.....	61
V. Adaptation d'un nœud de capteur .....	62

### **Chapitre III :**

#### **Système de Télésurveillance et de Diagnostic en Temps Réel**

I. Ennuis de télésurveillance des éoliennes.....	63
II. Paramètres surveillés dans une éolienne .....	66
III. Structure du système et de son réseau.....	67
IV. Conception du circuit de système.....	71
V. Simulation et analyse des résultats.....	74

### **Chapitre IV :**

#### **Identification des défauts par estimation fréquentielle**

I. Estimation à haute résolution.....	79
II. Modélisation des défauts de la machine éolienne.....	82
III. Modélisation du courant statorique du générateur d'éolienne .....	84
IV. Méthodes d'estimation et application .....	85
IV.1 Méthode de Prony.....	86
IV.2 Méthode de Pisarenko .....	88
IV.3 Méthode MUSIC.....	89
IV.4 Méthode des vecteurs propres EV .....	90
IV.5 Méthode de norme minimale MN.....	90
IV.6 Méthode ESPRIT.....	91
V. Critères de robustesse d'estimation .....	92

## **Chapitre V :**

### **Optimisation de la méthode ESPRIT-TLS**

I. Diagnostic de défauts par l'analyse spectrale.....	101
I.1 Nécessité de diagnostic .....	101
I.2 Type de diagnostic .....	102
I.3 Concepts de base de diagnostic .....	103
I.4 Algorithme de diagnostic par analyse spectrale .....	104
II. Limitations de la méthode ESPRIT-TLS .....	105
III. Théorie de la méthode ESPRIT-TLS .....	106
III.1 Estimation de la matrice d'auto-corrélation .....	106
III.2 Décomposition propre de la matrice d'auto-corrélation.....	108
III.3 Estimation fréquentielle .....	108
III.4 Estimation des puissances des harmoniques .....	109
IV. Amélioration des performances de la méthode ESPRIT-TLS .....	110
V. Simulation, analyse des résultats et champs d'application.....	113
V.1 Détection d'excentricité d'entrefer .....	115
V.2 Détection de barres rotoriques cassées.....	117
V.3 Détection de roulements endommagés .....	120
V.4 Détection de Désalignement .....	120
VI. Implémentation de Fast-ESPRIT sur un DSP .....	122

## **Chapitre VI :**

### **Classification à base de Fast-ESPRIT et la logique floue**

I. Méthodes de classification .....	125
II. Limitations et problématique de diagnostic d'une éolienne.....	128
III. Indicateur de sévérité d'un défaut .....	130
IV. Nouvelle approche floue pour la reconnaissance et le diagnostic.....	131
IV.1 Etapes de diagnostic flou.....	132
IV.2 Approche de diagnostic proposée.....	133
V. Simulation et analyse des résultats .....	137

<b>Conclusion</b> .....	<b>144</b>
-------------------------	------------

<b>Références Bibliographiques</b> .....	<b>150</b>
------------------------------------------	------------

<b>Annexes</b> .....	<b>163</b>
----------------------	------------

# Liste des figures

---

## Chapitre I

Figure I.1	Schéma d'un capteur classique.....	8
Figure I.2	Acquisition des données et actionnement.....	9
Figure I.3	Architecture générale d'un capteur intelligent.....	10
Figure I.4	Architecture matérielle d'un capteur intelligent.....	11
Figure I.5	Topologie en étoile des capteurs intelligents autonomes.....	14
Figure I.6	Communication multi-sauts ou coopérative dans un RCSF.....	15
Figure I.7	RCSF avec Clustering.....	16
Figure I.8	Indicateurs de performance de RCSF.....	22

## Chapitre II

Figure II.1	Capteur intelligent et interface de communication.....	28
Figure II.2	Topologie hybride pour les RCSF.....	31
Figure II.3	Communication dans un RCSF selon les couches OSI.....	35
Figure II.4	Protocoles sans fil en fonction de la portée et le débit permis.....	38
Figure II.5	Topologies Piconet et Scatternet de Bluetooth.....	38
Figure II.6	Topologies de ZigBee.....	40
Figure II.7	Trame de données.....	40
Figure II.8	Trame de commandes.....	41
Figure II.9	Trame de balise (beacon).....	41
Figure II.10	Trame de d'acquittement.....	41
Figure II.11	Trame PPDU.....	42
Figure II.12	Configurations IBSS et ESS du réseau Wi-Fi.....	44
Figure II.13	Modes de codage du réseau GPRS.....	47
Figure II.14	Temps de transmission selon la taille de données.....	50
Figure II.15	Portée du signal en fonction de la fréquence de transmission.....	51
Figure II.16	Consommation de l'énergie en fonction de la portée du signal.....	52
Figure II.17	Puissance reçue en fonction de la portée du signal.....	54
Figure II.18	Consommation de puissance pour chaque protocole.....	54
Figure II.19	Consommation d'énergie normalisée par protocole.....	55
Figure II.20	Indice de l'énergie par rapport à la longueur du paquet.....	56
Figure II.21	Evolution de débit en fonction du temps 'backoff'.....	57
Figure II.22	Taux d'erreur binaire pour différentes modulations.....	58
Figure II.23	Efficacité du codage en fonction de la taille des données.....	60
Figure II.24	Comparaison d'énergie de calcul.....	61
Figure II.25	Comparaison des caractéristiques des nœuds de capteurs.....	62

## Chapitre III

Figure III.1	Topologie de montage des capteurs.....	67
Figure III.2	Schéma bloc de l'architecture du système de télésurveillance et de contrôle.....	68
Figure III.3	Interconnexion entre le circuit d'Ethernet et le MCU.....	69
Figure III.4	Connexion entre CGI et le Serveur Web avec la base de données.....	70
Figure III.5	Schéma électronique du système IESCRM avec GPRS.....	71
Figure III.6	Schéma électronique du système IESCRM avec Wi-Max.....	72
Figure III.7	Structure du système de télésurveillance et de contrôle d'un parc éolien.....	72

Figure III.8	Page Web/Base de données de serveur de télésurveillance.....	73
Figure III.9	Scénario d'OPNET pour la surveillance d'un parc éolien avec GPRS via UMTS.....	75
Figure III.10	Scénario d'OPNET pour la surveillance d'un parc éolien avec Wi-Max.....	75
Figure III.11	Temps de réponse moyen pour une requête de la base de données via le réseau Wi-Max.....	75
Figure III.12	Temps de réponse moyen pour une requête de la base de données via le réseau GPRS.....	75
Figure III.13	Trafic moyen des requêtes reçues par la base de données.....	76
Figure III.14	Temps de réponse moyen d'accès à une page Web avec le service HTTP pour GPRS.....	76
Figure III.15	Temps de réponse moyen d'accès à une page Web avec le service HTTP pour Wi-Max.....	76
Figure III.16	Trafic moyen reçu avec le service HTTP.....	77
Figure III.17	Délai moyen d'activation de service au réseau GPRS.....	77
Figure III.18	Délai moyen d'activation de service au réseau Wi-Max.....	77

#### Chapitre IV

Figure VI.1	Procédure de détection des défauts avec une HRM.....	86
Figure VI.2	Courant d'induction statorique d'un générateur défectueux avec bruit (SNR=30dB) .....	93
Figure VI.3	MSE de l'estimation fréquentielle des barres rotoriques cassées.....	94
Figure VI.4	Variance moyenne de l'estimation fréquentielle des barres rotoriques cassées.....	94
Figure VI.5	Temps de calcul moyen pour la détection des barres rotoriques cassées par différentes MHR	95
Figure VI.6	MSE de l'estimation fréquentielle relative aux roulements endommagés.....	96
Figure VI.7	Variance moyenne de l'estimation fréquentielle relative aux roulements endommagés.....	96
Figure VI.8	Temps de calcul moyen de la détection des roulements endommagés par différentes MHR....	96
Figure VI.9	MSE de l'estimation fréquentielle du désalignement.....	97
Figure VI.10	Variance moyenne de l'estimation fréquentielle du désalignement.....	97
Figure VI.11	Temps de calcul moyen pour la détection du désalignement par les différentes MHR.....	97
Figure VI.12	MSE de l'estimation fréquentielle d'excentricité d'entrefer.....	97
Figure VI.13	Variance moyenne de l'estimation fréquentielle d'excentricité d'entrefer.....	97
Figure VI.14	Temps moyen du calcul de la détection d'excentricité d'entrefer avec différentes MHR.....	98
Figure VI.15	MSE de détection des barres rotoriques cassées pour un SNR=30dB.....	98
Figure VI.16	MSE de détection des roulements endommagés pour un SNR=30dB.....	98
Figure VI.17	MSE de détection de désalignement pour un SNR=30dB.....	99
Figure VI.18	MSE de détection d'excentricité d'entrefer pour un SNR=30dB.....	99

#### Chapitre V

Figure V.1	Diagnostic par modèle de connaissance.....	102
Figure V.2	Phases de diagnostic de défauts d'une machine à induction.....	103
Figure V.3	Organigramme général de diagnostic par l'analyse spectrale.....	104
Figure V.4	Schéma fonctionnel de l'algorithme Fast-ESPRIT.....	111
Figure V.5	Evolution du facteur de décimation avec la fréquence de défaut.....	112
Figure V.6	Diagnostic intelligent des anomalies d'éolienne à l'aide l'algorithme Fast-ESPRIT.....	114
Figure V.7	Estimation du nombre de fréquences du signal par le critère <i>MDL</i> selon SNR.....	116
Figure V.8	Gain fréquentiel du filtre IIR passe-bande de Yule-Walker.....	116
Figure V.9	Détection de défaut d'excentricité d'entrefer par Fast-ESPRIT.....	117
Figure V.10	Evolution de l'erreur moyenne d'estimation et de temps de calcul selon SNR.....	118
Figure V.11	Variation d'erreur moyenne d'estimation selon l'ordre du filtre IIR et le SNR.....	118
Figure V.12	Variation d'erreur moyenne d'estimation selon l'amplitude de défaut et le SNR.....	119
Figure V.13	Détection de défaut de barres rotoriques cassées par Fast-ESPRIT.....	119
Figure V.14	Détection de défaut de roulements endommagés par Fast-ESPRIT.....	120
Figure V.15	Détection de défaut de désalignement par Fast-ESPRIT.....	121
Figure V.16	Temps de calcul en fonction de la bande fréquentielle de défaut et le facteur de décimation...	122
Figure V.17	Etapas de diagnostic d'une machine électrique à l'aide un DSP.....	123

## Chapitre VI

Figure VI.1	Schéma fonctionnel des méthodes de classification.....	127
Figure VI.2	Schéma fonctionnel des méthodes de classification floues.....	132
Figure VI.3	Etapes de l'algorithme de diagnostic proposé.....	134
Figure VI.4	Organigramme de l'algorithme CAFH.....	135
Figure VI.5	Architecture du système d'inférence flou.....	137
Figure VI.6	Ensembles flous de la variable vibration.....	138
Figure VI.7	Ensembles flous de la variable indicateur de sévérité $C$ .....	139
Figure VI.8	Ensembles flous de la variable alarme.....	139
Figure VI.9	Règles d'inférence floues et la sortie du système.....	140
Figure VI.10	Ensemble des décisions du système flou.....	141

# Liste des tableaux

---

## Chapitre I

Tableau I.1	Classification et exemples de capteurs.....	13
Tableau I.2	Types des RCSF.....	17
Tableau I.3	Avantages des protocoles de communication des RCSF.....	18
Tableau I.4	Standards de communication pour les capteurs intelligents.....	21
Tableau I.5	Défis et contraintes des capteurs intelligents.....	23
Tableau I.6	Types d'applications des capteurs intelligents.....	24

## Chapitre II

Tableau II.1	Besoins en fonction des applications.....	29
Tableau II.2	Topologies des réseaux de capteurs et leur usage.....	32
Tableau II.3	Modèles de données selon les applications.....	34
Tableau II.4	Comparaison des protocoles de communication sans fil.....	37
Tableau II.5	Champs des trames MAC.....	42
Tableau II.6	Paramètres typiques des protocoles de communication sans fil.....	49
Tableau II.7	Paramètres de simulation de l'énergie de transmission.....	52
Tableau II.8	Paramètres de simulation de puissance reçue selon les protocoles.....	53
Tableau II.9	Caractéristiques électriques des chipsets.....	54
Tableau II.10	Valeurs de $E_b/N_0$ annulant le BER.....	59

## Chapitre III

Tableau III.1	Paramètres à surveiller de l'éolienne et capteurs correspondants.....	67
Tableau III.2	Paramètres de simulation de l'environnement Wi-Max.....	74
Tableau III.3	Paramètres de simulation de l'environnement UMTS.....	74

## Chapitre IV

Tableau IV.1	Signature fréquentielle des défauts d'éolienne.....	83
Tableau IV.2	Paramètres utilisés dans la simulation du courant statorique avec défauts.....	93
Tableau IV.3	Scénarios de simulation de défauts.....	93
Tableau IV.4	Classement des méthodes HRM étudiées selon leurs performances.....	99

## Chapitre V

Tableau V.1	Paramètres de simulation.....	115
Tableau V.2	Comparaison de performance de calcul.....	115
Tableau V.3	Paramètres de défaut d'excentricité d'entrefer.....	115
Tableau V.4	Paramètres de défaut barres rotoriques cassées.....	117
Tableau V.5	Paramètres de défaut roulements endommagés.....	120
Tableau V.6	Paramètres de défaut désalignement.....	121

## Chapitre VI

Tableau VI.1	Comparaison des valeurs d'indicateur C de sévérité pour différents types de défauts.....	129
Tableau VI.2	Comparaison entre les indicateurs de sévérité pour différents types de défauts.....	131
Tableau VI.3	Type des différents défauts étudiés selon leur indice.....	134
Tableau VI.4	Paramètres du FIS.....	137

Tableau VI.5	Règles SI-ALORS du système d'inférence flou.....	139
Tableau VI.6	Actions et modes opératoires selon le niveau d'alarme.....	141
Tableau VI.7	Paramètres de simulation des différents types de défauts.....	142
Tableau VI.8	Résultats de simulation.....	143

# Liste des Acronymes

---

Pour des raisons de lisibilité, la signification d'une abréviation ou d'un acronyme qui apparait sur les différents chapitres de cette thèse est arrangée dans le tableau suivant selon l'ordre alphabétique. A noter que le plus souvent, le terme anglais est le plus utilisé.

3G                    Troisième Génération des normes de téléphonie mobile (UMTS)

## A

AC/DC            Alternating Current /Direct Current  
ACK              Acknowledgement receipt of data  
ADC              Analog to Digital Converter  
AES              Advanced Encryption Standard  
AOA              Angle of Arrival  
AP                Access Point  
API               Application Programming Interface  
AWGN            Additive White Gaussian Noise

## B

BER              Bit Error Rate  
BPSK            Binary phase-shift keying  
BSS              Basic Service Set  
BTS              Base Transceiver Station

## C

CAFH            Classification Algorithm of Fault Harmonics  
CAN              Controller Area Network  
CBC              Cipher Block Chaining  
CCK              Complementary Code Keying  
CCM              Compression Client Manager  
CGI              Common Gateway Interface  
CH                Cluster Head  
CMAC            Cipher based Message Authentication Code  
CPFSK           Continuous Phase Frequency Shift Keying  
CPU              Central Processing Unit  
CPU              Central Processing Unit  
CRC              Cyclic Redundancy Check  
CS                Coding Scheme  
CSA              Current Signature Analysis  
CSMA/CA       Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance  
CT                Concordia Transform

## **D**

DCS	Digital Cellular System
DEEC	Distributed Energy Efficient Clustering
DFFT	Discrete Fast Fourier Transform
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
DOA	Direction of Arrival
DPSK	Differential Phase-Shift Keying
DQPSK	Differential Quaternary Phase-Shift Keying
DS	Distribution System
DSP	Digital Signal Processor
dsPIC	digital signal processing Peripheral Interface Controller
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
DWT	Discrete Wavelet Transform

## **E**

EAP-SIM	Extensible Authentication Protocol- Subscriber Identity Module
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
ENC	Ethernet Network Controller
ESPRIT	Estimation of Signal Parameters by Rotational Invariance Techniques
ESS	Extended Service Set
EV	Eigen Vector

## **F**

FFD	Full Function Device
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum
FIS	Fuzzy Inference System
FSDO	Frequency Signal Dimension Order
FTP	File Transfer Protocol

## **G**

GEA	Generic Ethernet Access
GFSK	Gaussian frequency-shift keying
GGSN	Gateway GPRS Support Node
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
GTS	Guaranteed Time Slots

## **H**

HART	Highway Addressable Remote Transducer Protocol
------	------------------------------------------------

HMAC Hash Message Authentication Code  
HRM High Resolution Methods  
HTTP Hypertext Transfer Protocol

## I

I2C Inter Integrated Circuit  
IBSS Independent Basic Service Sets  
ID Identifier  
IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers  
IESRCM Intelligent Embedded System for Control and Remote Monitoring  
IIR Infinite Impulse Response  
IP Internet Protocol  
IR-UWB Impulse Radio Ultra Wideband  
IS Impedance Spectroscopy  
ISP Internet Service Provider

## L

LCD Liquid Crystal Display  
LEACH Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy  
LLC Logical Link Control

## M

MAC Medium Access Control  
MCSA Motor Current Signal Analysis  
MCU Microcontroller Unit  
MD5 Message-Digest Algorithm  
MDL Minimum Description Length  
MN Minimum Norm  
MODEM Modulation Demodulation  
MSE Mean Square Error  
MUSIC Multiple Signal Classification

## O

OFDM Orthogonal Frequency-Division Multiplexing  
OOK On-Off Keying  
OSI Open Systems Interconnection

## P

PAM Pulse-Amplitude Modulation  
PCA Principal Component Analysis  
PCS Personal Communications Service  
PHD Pisarenko Harmonic Decomposition  
PHP Hypertext Preprocessor  
PHY Physical Layer  
PIN Personal identification number

PPDU PHY Protocol Data Units  
 PPM Pulse-Position Modulation  
 PROM Programmable Read Only Memory  
 PSD Power Spectral Density  
 PSDU PHY Service Data Unit  
 PTMC Point-To-Multipoint Communication  
 PWM Pulse-Width Modulation

**Q**

QAM Quadrature Amplitude Modulation  
 QoS Quality of Service

**R**

RAM Read Access Memory  
 RC4 Rivest Cipher 4  
 RCSF Réseaux de Capteurs Sans Fil  
 RF Radio Fréquence  
 RFD Reduced Function Device  
 RFID Radio Frequency Identification  
 RNC Radio Network Controller  
 RX Reception

**S**

SEP Stable Election Protocol  
 SGSN Serving GPRS Support Node  
 SIM Subscriber Identity Module  
 SMTP Simple Mail Transfer Protocol  
 SNR Signal to Noise Ratio  
 SQL Structured Query Language  
 STFT Short-Time Fourier Transform

**T**

TCP Transmission Control Protocol  
 TDEEC Threshold Distributed Energy-Efficient Clustering  
 TDMA Time division multiple access  
 TLS Total Least Square  
 TS Time Slot  
 TX Transmission

**U**

UGS Unsolicited Grant Service Flow  
 ULP Ultra-Low Power  
 ULP Ultra Low Power  
 UMTS Universal Mobile Telecommunications System  
 USB Universal Serial Bus  
 UWB Ultra Wide Band

**V**

VoIP Voice over IP

## W

Wi-Fi	Wireless Fidelity
Wi-Max	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPAN	Wireless Personal Area Network
WRAN	Wireless Regional Area Network
WSN	Wireless Sensors Network
WWAN	Wireless Wide Area Network

# Introduction

---

Le domaine d'instrumentation et de métrologie a fortement évolué ces dernières années. Son développement est basé sur l'électronique, sur les technologies de l'information et sur celles de la communication. Cela a donné naissance à ce qu'on appelle désormais les systèmes à base de capteurs intelligents ou les réseaux de capteurs intelligents. Ils ont la capacité d'acquérir les données et de collaborer pour les communiquer en temps réel aux stations de contrôle, à travers des liaisons câblées ou sans fil. Cela est rendu possible grâce à des protocoles de routage bien adaptés. Ces systèmes sont actuellement en pleine expansion en raison de leurs diverses fonctionnalités d'intelligence. En effet, l'implémentation de ces fonctions automatiques rend ces systèmes plus autonomes, plus efficaces et plus performants. Ils le sont ainsi en termes de collecte, de fusion, d'analyse des données, de détection des événements, de diagnostic des défaillances, d'aide à la prise de décision, de régulation et de commande en temps réel (localement ou à distance). Le but essentiel de la mise en œuvre de tels systèmes est la réalisation des tâches de contrôle, de supervision, de conduite des processus, de télésurveillance et de maintenance proactive, tout en exploitant leurs ressources disponibles (mémoires, calculateur programmable, convertisseurs ADC, modules de communication, algorithmes, alarmes, etc.) [1-31]. Ces systèmes ont trouvé leur mise en application dans de nombreux champs pratiques. Pourtant, ils exigent des techniques de traitement du signal très avancées pour l'acquisition numérique des mesures qui sont nécessaires pour la compréhension, la corrélation, le diagnostic ainsi que pour l'identification de certains phénomènes et événements physiques.

La théorie de diagnostic d'état d'un système physique permet d'identifier toute sorte de ses anomalies à partir d'observation de ses symptômes apparents. L'objectif de diagnostic ne s'arrête pas ici mais comprend aussi la définition des remèdes à apporter et la prise de mesures adéquates pour réparer ce système ou pour le ramener à son mode de fonctionnement normal. Cela concerne donc les tâches de prévention, de maintenance et de dépannage du système indiqué [32-35].

Le diagnostic est en effet, un processus comportant trois grandes fonctions : la détection, la localisation et la décision. Parmi les techniques de diagnostic mises en œuvre actuellement, l'analyse spectrale. Elles sont souvent liées au domaine d'application et dépendent très fortement de la propriété d'existence des paramètres fréquentielles relatives aux causes de dysfonctionnement du système considéré.

Ce diagnostic fait intervenir la théorie d'estimation spectrale paramétrique. Cette théorie est fondée sur l'approche signal. Elle s'appuie sur l'analyse des données acquises, sous forme de tension et/ou de courant électriques échantillonnées. En effet, des outils de traitement numérique du signal sont appliqués à ces signaux temporels pour obtenir leur contenu spectral. Cela va être valable dans la mesure où de nombreux phénomènes s'interprètent par l'apparition de fréquences parasites additives (harmoniques ou raies) dans les grandeurs affectées par les défauts [32-41].

Le rôle essentiel que jouent ces outils réside alors dans l'extraction de connaissances et de paramètres structuraux à partir de l'information utile. Cela est dans le but de détecter et de localiser les défaillances ou les pannes du système ciblé.

Cette méthode de détection automatique des anomalies a poussé les chercheurs vers le développement, l'amélioration et l'introduction d'une grande variété d'algorithmes et d'approches performantes de traitement du signal. Elles sont analysées avec de nombreux modèles de signaux au niveau de la vitesse de calcul et de la précision. L'objectif a été l'innovation de l'efficacité des systèmes de diagnostic à base de capteurs intelligents communicants par l'intégration de ces algorithmes dans leurs processeurs [37-42].

Les méthodes d'estimation spectrale à haute résolution HRM telles que Prony, Pisarenko, MUSIC, ESPRIT, etc., ont été utilisées dans le domaine des télécommunications. Elles le sont ainsi pour l'estimation des directions ou des angles d'arrivée DOA ou AOA d'une onde électromagnétique par une antenne. Actuellement, ces techniques s'utilisent dans la localisation et le positionnement des nœuds d'un réseau de capteurs ou d'une cible dans un réseau de téléphonie mobile. Ce sont des méthodes très sophistiquées [43-46]. Elles dépassent les limites et les inconvénients en résolution spectrale, remarquées dans l'analyse classique réalisée par la transformée de Fourier discrète rapide DFFT. Ces algorithmes traitant des signaux temporels sur une durée limitée, font tous l'hypothèse d'un modèle mathématique et d'un nombre de sinusoides connus a priori. Cet ordre est nécessaire pour l'estimation fréquentielle d'un signal. Il peut être déterminé facilement par le critère MDL de Rissanen développé en théorie de l'information. En fait, toutes les méthodes d'estimation de haute résolution peuvent être appliquées à un modèle du signal plus général qui le représente comme une somme de sinusoides complexes modulées exponentiellement [43-54].

Les méthodes HRM reposent sur des propriétés particulières de la matrice de covariance ou d'auto-corrélation du signal et sur sa décomposition en valeurs et en vecteurs propres [43-55]. Cela pour estimer les composantes fréquentielles contenues dans ce signal avec leurs amplitudes

correspondantes. Ces techniques séparent le signal en deux sous-espaces : l'espace de données utiles engendré par les sinusoïdes et l'espace bruit qui est son complémentaire orthogonal. Leur supériorité en termes de résolution spectrale d'après la littérature, se révèle particulièrement performante, même dans le cas des signaux fortement atténués par un bruit gênant. Cela les favorise d'accomplir le rôle d'indication de l'existence de défauts ou d'anomalies selon leur signature spectrale qui les caractérise dans tout signal étudié.

Dans la littérature, on a pu constater que depuis quelques années, une émergence et une orientation rapides de nouveaux travaux de recherche vers l'étude, le développement et le perfectionnement de ces approches pour amender leur résolution par minimisation de l'erreur d'estimation et pour abaisser leur forte complexité algorithmique [55-86].

Dans l'autre côté, le diagnostic par l'analyse spectrale ne permet ni la discrimination entre les différents types de défaillances ni la quantification de leur degré de sévérité. Cela ne sert pas à éviter les fausses alarmes ou inutiles. Toutes ces limitations ont suscité l'intérêt des spécialistes et des chercheurs à découvrir d'autres algorithmes issus de l'intelligence artificielle et de la théorie de classification. Le but était d'augmenter la précision et la robustesse de ce genre de diagnostic [34-41, 87-92]. Lorsque chacun de ces algorithmes est implémenté parfaitement, le système de diagnostic devient capable de prendre des décisions adéquates devant toute situation critique.

Dans les systèmes du diagnostic, le temps joue un rôle important. Sa prise en compte peut avoir une influence sur différents aspects. Certes, le temps est un facteur décisif dans le choix du modèle d'un système, dynamique ou statique, dans la réaction face à la détection des anomalies, fugitives ou évolutives, le plus rapidement possible, de les isoler, d'en identifier les causes probables de façon à réduire leurs effets néfastes, et puis de proposer des opérations de traitement correctives, urgentes ou adaptées. C'est pour cette raison que l'intégration du concept de temps réel est instamment exigée dans ce type de systèmes.

La mise en application de ces systèmes de diagnostic ne se limite pas seulement aux domaines techniques et industriels mais s'étend à d'autres domaines tels que la médecine, le biomédical, etc. En effet, le diagnostic médical, automatisé, basé sur la théorie de décision et d'apprentissage à partir de l'étude de cas, est devenu actuellement une nécessité très importante, surtout avec l'apparition des capteurs biomédicaux [28, 49, 93].

La modernisation et l'automatisation des systèmes électriques, industriels, mécaniques et électromécaniques complexes ont imposé l'intégration des systèmes du diagnostic des défauts au moyen de l'analyse spectrale. Cette dernière est basée sur la technique MCSA. Puisque ces dispositifs sont susceptibles à de nombreux types de pannes dans leur usage, il est possible de suivre automatiquement et dynamiquement avec un logiciel simple leur état de fonctionnement à tout instant. Cela est concrétisé par l'incorporation des processeurs du signal numérique DSP dans des réseaux câblés ou sans fil. Par conséquent, cela permet de protéger toute machine contre tout dommage catastrophique et d'optimiser sa productivité sans avoir recours à d'onéreuses infrastructures ou à des dépenses supplémentaires [34, 38-41, 94-98].

Aujourd'hui, le recours aux énergies renouvelables est devenu un choix stratégique et nécessaire devant l'accroissement imprévu des coûts de l'énergie classique. Par ailleurs, une préoccupation environnementale s'impose, vu les recommandations exigées par des associations, des organisations et des services gouvernementaux pour la réduction des émissions provoquant des changements climatiques à effet de serre menaçant la terre. Ces causes ont incité la recherche et l'utilisation des sources d'énergie alternatives propres telles que les énergies renouvelables. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne constitue un véritable champ d'application des systèmes de diagnostic à base de capteurs intelligents. Plusieurs travaux sont en cours d'exécution dans ce sens [99-116].

C'est dans ce contexte est choisi le sujet de cette thèse. C'est l'étude des apports permettant l'amélioration et la perfection des méthodes de détection et de diagnostic des défauts au sein des machines éoliennes. C'est aussi l'analyse de leur implémentation dans des systèmes communicants à base de capteurs intelligents. C'est un sujet multidisciplinaire qui couvre un axe de recherche concernant un grand nombre de spécialités scientifiques, telles que l'informatique, les télécommunications, l'électronique, l'automatique, le traitement du signal et l'intelligence artificielle.

Le développement de ces systèmes de diagnostic à base de capteurs intelligents et leur mise en application, dans le contrôle et dans la supervision à distance d'un parc éolien est un défi majeur. Dans ce perfectionnement, on vise l'originalité, l'innovation, la créativité et l'efficacité. Ces objectifs peuvent être dépendants des contraintes et des exigences de l'application comme les types de machines éoliennes, leur nombre, leur déploiement géographique, etc.

Les machines éoliennes nécessitent périodiquement et en temps réel certaines maintenances. En effet, elles le sont sous des conditions d'environnement et de fonctionnement variables. Une

télémaintenance proactive automatisée s'impose. Cela permet d'assurer une durée de vie optimale. Cela est justifié par le fait que l'arrêt d'une installation éolienne pour effectuer des opérations de maintenance non prévues entraîne des coûts très importants. Cette perte d'exploitation devient préoccupante pour toute entreprise, sans oublier la détérioration rapide des pièces de ces machines. Celle-ci est due à l'évolution fatale ou destructive des défaillances non surveillées qui conduit à des dégâts considérables [116-121].

Pour résoudre ces problèmes, on a visé des objectifs dans cette thèse. Leur réalisation constituera une solution globale et satisfaisante. Il s'agit d'étude, de simulation, de conception d'une architecture centralisée de télésurveillance et de diagnostic en temps réel des défauts d'éoliennes. Cette approche est basée sur l'utilisation des capteurs intelligents, embarqués et autonomes, intégrant une technique d'estimation spectrale à haute résolution. Elle est appliquée dans l'analyse du courant statorique acquis du générateur d'éolienne. Cette technique permet de détecter et de cerner l'apparition des spectres de raies caractérisant la signature de tout défaut. Les données collectées par les différents capteurs installés sur chaque éolienne sont transmis via une communication sans fil vers la station de surveillance pour être stockées sur une base de données et analysées. Le traitement de ces données ainsi sauvegardées permet le calcul avec précision du niveau de sévérité des défauts révélés dans le but de prendre une décision et une réaction convenables.

D'une vision holistique, ce système de télésurveillance ainsi suggéré, doit vérifier plusieurs exigences :

- Accroître la productivité et la qualité à moindre coûts avec un budget raisonnable ;
- Minimiser la consommation d'énergie par les instruments ;
- Garantir et préserver la sûreté de fonctionnement des équipements ;
- Informer le centre de surveillance de manière périodique de toute anomalie détectée avec son niveau de gravité ;
- Protéger le personnel comme les opérateurs, les techniciens,... contre les accidents du travail par arrêt immédiat des machines défaillantes ou endommagées ;
- Protéger l'environnement par alerte précoce de l'occurrence de risques comme des incendies, des explosions, des fuites, des pollutions ;
- Réduire l'intervention répétitive du personnel de maintenance qui demande parfois un long déplacement ;

Motivé par toutes ces raisons et pour atteindre les objectifs tracés, on a prévu de focaliser notre intérêt, de point de vue méthodologique, sur la formulation de plusieurs problématiques. Leur résolution constitue mes contributions et la valeur ajoutée de cette thèse. Elle consiste à définir le gabarit de ce travail de recherche. Son mémoire est donc structuré en six chapitres avec une conclusion. Il est résumé comme suit :

Au chapitre I, on a donné un aperçu général sur la notion des systèmes à base de capteurs intelligents et sur les types de leurs applications. On a décrit les capteurs intelligents et leurs avantages. On a commenté leurs protocoles de communication pour acheminer les commandes et les données. Des métriques de leurs performances y sont décrites. Les limitations, les défis et les challenges de ce genre de systèmes y sont résumées aussi.

Dans le chapitre II, on a traité la problématique liée aux critères du choix d'une technologie de communication sans fil optimale. On a commenté une analyse comparative des performances et des limites des protocoles sans fil : Wi-Fi, Wi-Max, UWB, Bluetooth, ZigBee, ZigBeeIP, GSM/GPRS. On a interprété des simulations sous Matlab. On a prouvé la façon parfaite et rentable d'exploiter un protocole garantissant la qualité de communication, minimisant la consommation énergétique et évitant les contraintes du temps. Un bilan comparatif de tous ces résultats est y commenté.

Au chapitre III, on a décrit l'étude de conception d'un système de diagnostic et de télésurveillance en temps réel d'un parc éolien. On a interprété la possibilité d'en incorporer des modules sans fil GPRS ou Wi-Max, pour recueillir des mesures de divers capteurs intelligents. Des simulations avec les outils logiciels Matlab, Proteus ISIS et OPNET ont été commentées, pour montrer l'efficacité du système proposé.

Alors qu'au chapitre IV, on a présenté la modélisation des défauts les plus courants d'une éolienne et la modélisation de son courant statorique. On a décrit une étude comparative entre plusieurs algorithmes d'estimation fréquentielle à haute résolution pour identifier ces défauts. On a y commenté ses critères de performance prises en compte. Des simulations sous Matlab ont été y commentées.

Dans le chapitre V, on a commenté le principe d'amélioration de la méthode ESPRIT-TLS pour la rendre applicable en temps réel. On a élaboré l'optimisation de la taille de la matrice d'auto-corrélation du signal traité. On a commenté la simulation sous Matlab de la nouvelle méthode Fast-ESPRIT. On a montré sa performance dans l'identification des fréquences et des amplitudes caractérisant toute sorte de défauts étudiés de la machine éolienne.

Enfin au chapitre VI, on a décrit un nouveau module décisionnel. Il est basé sur une nouvelle approche de contrôle en temps réel de l'état de fonctionnement d'une éolienne. On a généré une procédure efficace permettant l'amélioration de la précision de diagnostic par la classification et la quantification du niveau de sévérité de toute défaillance. On a commenté la simulation sous Matlab de cette approche basée sur la logique floue et sur la méthode Fast-ESPRIT. Les résultats étaient très satisfaisants.

On a conclu ce mémoire de thèse en résumant les différentes étapes des travaux de recherche effectués et en fournissant les principaux résultats obtenus avec leurs perspectives.

# Chapitre I

---

## Systemes à base des capteurs intelligents et leurs applications

### I. Structure d'un capteur intelligent

Les capteurs intelligents intègrent des fonctionnalités supplémentaires leur permettant de relier le monde physique avec le monde numérique en capturant et en révélant des phénomènes physiques du monde réel et la conversion de ceux-ci dans une forme qui peut être traitée et stockée dans le but d'agir et de prendre une décision.

La détection, qui est la fonction primordiale d'un capteur, est une technique utilisée pour recueillir des informations sur un objet physique ou sur un processus, y compris la survenance d'événements (par exemple, les changements d'état tels que la baisse de la température ou de la pression). Un objet exécutant une telle tâche de détection est appelé un capteur. C'est un dispositif de prélèvement d'informations qui convertit une grandeur physique ou un événement en une autre grandeur physique de nature différente (très souvent signal électrique). Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure, de calcul, d'analyse ou de commande. Un autre terme couramment utilisé est le transducteur, qui est souvent utilisé pour décrire un dispositif qui convertit l'énergie d'une forme à une autre. La figure I.1 illustre le schéma d'un capteur classique [1, 2, 3, 5].

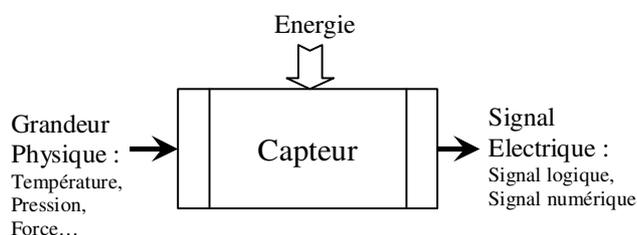


Figure I.1 Schéma d'un capteur classique

Les étapes effectuées dans une tâche de détection (ou d'acquisition de données) sont représentées sur la figure I.2. Les phénomènes physiques (souvent désignés comme des procédés, systèmes) sont

observés par un capteur. Les signaux électriques qui en résultent ne sont souvent pas prêt pour un traitement immédiat. Par conséquent, ils passent par une étape de conditionnement du signal. Une série d'opérations peut être appliquée au signal de capteur afin de le préparer pour une utilisation ultérieure. En effet, les signaux ont souvent besoin d'amplification (ou d'atténuation) pour modifier leur amplitude afin de mieux les correspondre à la gamme du convertisseur analogique-numérique suite à la conversion. En plus, le conditionnement de signaux applique souvent un filtrage ou une compensation pour éliminer les bruits indésirables (grandeurs d'influence) dans certaines gammes de fréquences. Après le conditionnement, le signal analogique est transformé en un signal numérique en utilisant un convertisseur Analogique/Numérique ADC. Le signal est maintenant disponible sous forme numérique et prêt pour un traitement ultérieur de stockage ou de visualisation [5-7].

De nombreux réseaux de capteurs sans fil inclus aussi des actionneurs qui leur permettent de contrôler directement les procédés physiques avec la coopération d'un dispositif de traitement (contrôleur) en formant ainsi une boucle de régulation fermée représentée sur la figure I.2.

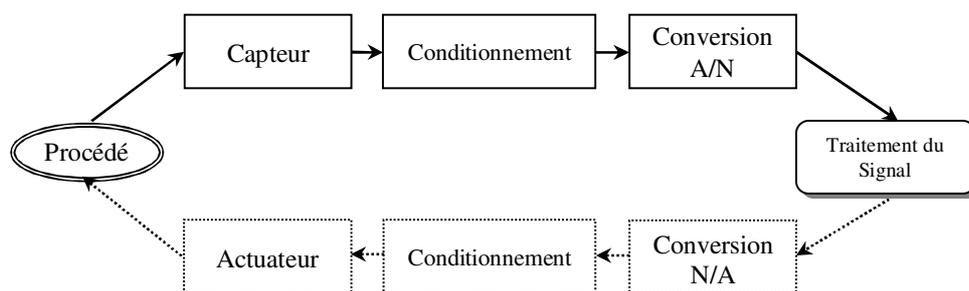


Figure I.2 Acquisition des données et actionnement

Un capteur est à qualifier de *smart* lorsqu'il exploite un traitement numérique piloté par un microprocesseur embarquée quelque soit son apport en termes de services. Tandis qu'un capteur sera *intelligent* lorsqu'il sera capable en plus de participer au système de contrôle, permis par une interface de communication bidirectionnelle. Il est également capable d'envoyer sa mesure à la demande ou de manière systématique à destination du système qui devra l'exploiter. En outre, ce système doit être reconfigurable et capable d'effectuer l'interprétation de données nécessaires, diagnostic avancé, la fusion de données provenant de multiples capteurs et la validation des données locales et recueillies à distance. Le capteur intelligent contient donc une fonctionnalité de traitement embarquée qui fournit des ressources de calcul pour effectuer des tâches de détection et

d'actionnement plus complexes avec des applications de haut niveau. Cette différence est illustrée par la figure I.3 [2, 4, 5, 6].

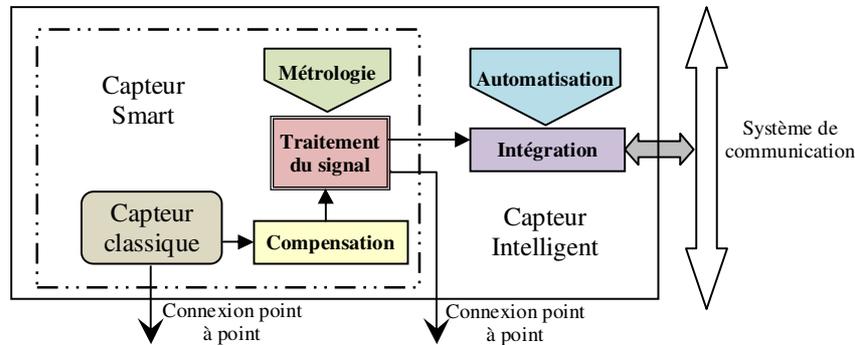


Figure I.3 Architecture générale d'un capteur intelligent

D'un point de vue matériel, un capteur intelligent se compose alors de quatre unités montrées sur la figure I.4 [1, 2, 5, 7-11] :

- 1) Un **capteur principal** spécifique au mesurande avec ses dispositifs d'acquisition et de numérisation du signal de sortie du capteur : transducteur, conditionneur qui adapte le signal électrique en vue de sa transmission, multiplexeur, amplificateur, échantillonneur bloqueur, convertisseur analogique/numérique ;
- 2) Un **organe de calcul** numérique (microcontrôleur, microprocesseur, dsPIC) servant au calcul et à la gestion de l'acquisition, la correction des effets des grandeurs d'influence au moyen de paramètres stockés en mémoire PROM, la linéarisation, le diagnostic des capteurs ;
- 3) Une **interface de communication** assurant la liaison du capteur à un ordinateur central et permettant un dialogue bidirectionnel de données numériques avec le système d'automatisation. Cette interface radio ou filaire est caractérisée par :
  - plage fréquentielle ;
  - technique de modulation ;
  - type de multiplexage ;
  - type de canal ;
  - étalement de spectre ;
- 4) Une **alimentation** assurant une stabilisation des tensions est nécessaire à l'électronique de l'instrument. Une batterie peut être envisagée pour maintenir certaines activités en l'absence de source d'énergie extérieure (horloge, mémoire,...).

Le transducteur permet de détecter toute variation de la grandeur physique en entrée du capteur. Sa conception est étroitement liée au domaine d'application pour lequel le capteur sera utilisé. L'interface de communication permet également au capteur intelligent de recevoir les informations du système nécessaires à l'élaboration de sa mesure et à sa validation. Elle peut également être utilisée dans les phases de calibration et de mise en service de l'équipement dans son environnement du travail.

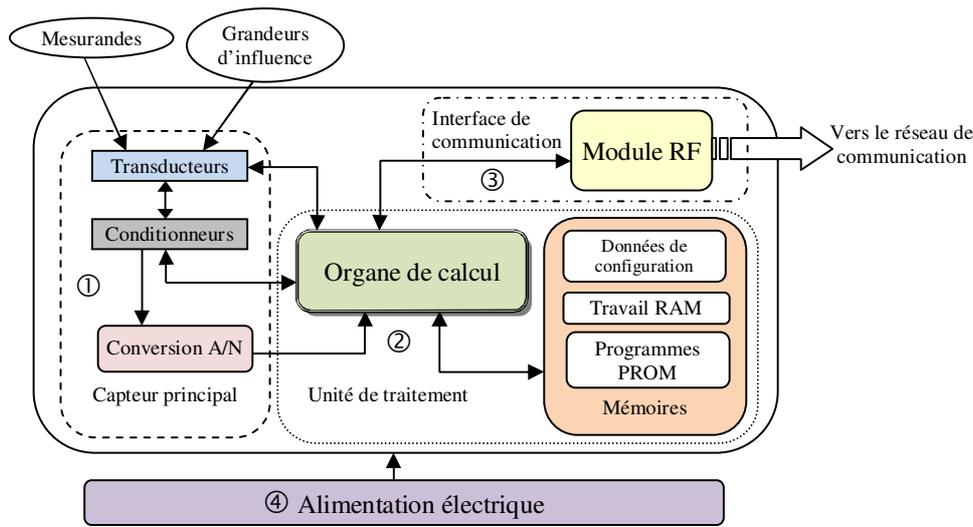


Figure I.4 Architecture matérielle d'un capteur intelligent

Donc un capteur intelligent peut être considéré comme un véritable système embarqué autonome, qui devra posséder son propre système d'exploitation lui permettant de coopérer au sein d'une organisation.

## II. Avantages de l'intelligence d'un capteur

L'intelligence du capteur intelligent réside dans sa capacité de vérification du bon déroulement d'un algorithme de métrologie. Cette intelligence est liée à l'amélioration de performances de capteur (exactitude, temps de réponse,...) par l'accroissement de la crédibilité de la mesure. Un capteur intelligent offre des avantages spécifiques tels que [2, 3, 7-11] :

- la possibilité de configurer le capteur à distance ;
- la crédibilité accrue des mesures ;
- la coopération via un système de communication dédié en temps réel ;
- l'aide à la maintenance et à la prise de décision grâce aux informations d'état fournies ;
- la participation à la commande du système en intégrant des fonctions de commande-régulation ;

- la participation à la sécurité du système en offrant des possibilités d'alarme ;
- la télésurveillance ;

Les fonctions d'un système aux capteurs intelligents peuvent être décrites en termes de :

- compensation ;
- validation ;
- traitement de l'information ;
- communications ;
- intégration ;

La combinaison de ces éléments respectifs permet aux capteurs intelligents un mode de fonctionnement autonome effectuant une détection active. La compensation est la capacité du système à détecter et à réagir aux changements dans l'environnement réseau à travers les routines d'autodiagnostic, d'auto-calibrage et d'adaptation. Un capteur intelligent doit être en mesure d'évaluer la validité des données recueillies, les comparer à celles obtenues par d'autres capteurs et de confirmer l'exactitude de toute variation de données suivantes. Ce processus comprend essentiellement l'étape de configuration du capteur. Ce type de capteurs offre des avantages [2, 3, 5, 7-11] :

- **Métrologiques** : accroissement de la précision (fusion de données, auto-calibrage, coopération,...) ;
- **Fonctionnels** : aide à la maintenance par autotest intégré susceptible de déterminer automatiquement quel est l'élément défaillant, de transmettre des indications d'erreurs, mémorisation des évènements redoutés, configuration à distance, alarme ;
- **Economiques** : réduction des durées d'étalonnage et de calibration, fiabilité accrue, allègement de la charge du calculateur central,...

### III. Classification des capteurs intelligents

Le choix d'un capteur à intégrer pour une application dépend de la grandeur physique à surveiller. Dans de nombreux domaines (industrie, recherche scientifique, services, loisirs, etc.), on a besoin de contrôler de nombreux paramètres physiques (température, force, position, vitesse, luminosité, etc.). Le capteur est l'élément indispensable à la mesure de ces grandeurs physiques.

La classification des capteurs peut être également basée sur les méthodes qui s'appliquent sur les phénomènes électriques et qui se servent pour convertir les mesurandes physiques en signaux électriques. Le tableau I.1 résume quelques grandeurs physiques y compris les technologies de détection utilisées pour les convertir.

Dans notre contribution, on est basé sur l'exploitation du courant statorique issu du générateur d'une éolienne dans le but de réaliser un capteur intelligent qui détecte les anomalies de la machine. Par ailleurs, en adoptant une approche fondée sur la consommation énergétique, les capteurs sans fil peuvent être classifiés en deux types : actif et passif [1, 5, 7, 8].

Tableau I.1 Classification et exemples de capteurs

Type	Exemple
Température	Thermistance, voltage transistor base-émetteur
Pression, tactile	Piézorésistive, capacitive
Optique	Photodiodes, phototransistors, infrarouge
Acoustique	Piézoélectrique résonateurs, microphones
Mécanique	Piézorésistive, capacitive, Piézoélectrique
Déplacement, vibration	Réductance variable, effet Hall, optoélectronique
Humidité	Résistive, capacitive
Position et distance	GPS, radar, ondes ultrasoniques, infrarouge
Chimique	pH, gaz infrarouge
Radiation	Détecteurs d'ionisation, compteurs Geiger-Mueller
Débit	Pression
Vitesse (linéaire/angular)	Réductance variable, effet Hall, optoélectronique
Courant/tension	Flux magnétique, résistance
Electromagnétique	Effet Hall, magnétomètres

### III.1 Capteurs actifs

Un capteur actif est un système de mesure qui nécessite une source d'énergie embarquée, la plus fréquemment assurée par une batterie. Cela pour la réalisation de la phase de traitement pendant laquelle le signal est filtré, amplifié et converti en un format compatible et exploitable. Pour ce type, le capteur doit non seulement mesurer des propriétés physiques mais doit également effectuer des opérations additionnelles via des circuits de traitement et de communication intégrés. Cet instrument est surtout utilisé pour assurer des mesures continues en temps réel [7, 8, 11].

### III.2 Capteurs passifs

Les capteurs passifs sont des dispositifs qui ne possèdent pas de source d'énergie embarquée et présentent l'avantage d'être facilement intégrables. Ce type de capteur est utilisé dans des

applications spécifiques qui nécessitent des unités de mesure miniatures, passives, de grande précision et fiables. Leur objectif est d'assurer des mesures à distance des grandeurs physiques.

Dans ce cas, deux différentes technologies peuvent être utilisées pour la transmission sans-fil de données : la transmission inductive et la transmission radio basée sur la réflexion (transpondeur passif). Par exemple, le capteur RFID qui lorsqu'il reçoit suffisamment d'énergie pour être activé, son système renvoie un message au lecteur, qui a la fonction de décodage.

Devant les besoins des structures en instrumentation massive et diversifiée, le concepteur est incité à développer des systèmes dont les nœuds (les capteurs) peuvent être organisés en de multiples topologies, selon des configurations qui permettent à l'utilisateur d'adapter physiquement l'instrumentation déployée sur le terrain d'observation à la vision logique qu'il en a depuis la supervision [7, 8, 11].

#### IV. Topologies des capteurs intelligents sans fil

Les systèmes à base de capteurs intelligents sont classifiés selon leur topologie de communication sous forme des deux classes suivantes.

##### IV.1 Capteurs intelligents autonomes

Dans cette architecture, lorsque la portée du module radio-fréquence est suffisamment large, les capteurs intelligents réalisant une mission de détection relative à un procédé peuvent transmettre directement les mesures d'une manière autonome à la station de base à travers une communication point à point en formant une topologie en étoile comme le montre la figure I.5.

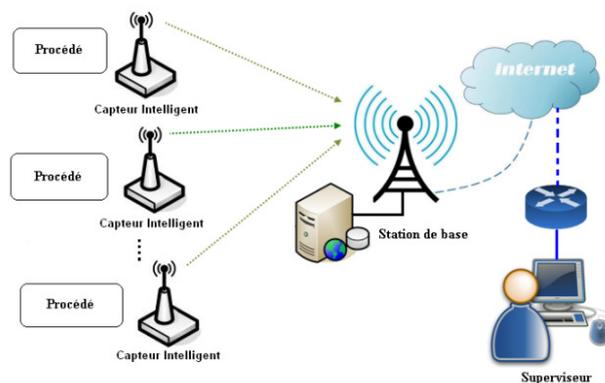


Figure I.5 Topologie en étoile des capteurs intelligents autonomes

La station de base envoie ensuite les données collectées pour les superviseurs via une passerelle, souvent en utilisant Internet ou tout autre canal de communication. Cependant, ce modèle de liaison directe n'est pas pratique car la communication entre un capteur et sa station de base n'est pas toujours possible vue la limitation de la portée de transmission et les atténuations causées par des obstacles ou par des bruits dans le canal de communication [9, 12, 13].

## IV.2 Réseau de capteurs intelligents

Dans une zone géographique de déploiement plus vaste ayant une dimension dépassant la portée de la couverture radio-fréquence des capteurs, la détection devient une tâche très difficile. Pour pallier à cette difficulté, un réseau ad-hoc de capteurs appelé réseau de capteurs sans fil RCSF ou WSN est construit au fur et à mesure en fonction des besoins et des ressources disponibles et sans infrastructure comme représenté sur la figure I.6.

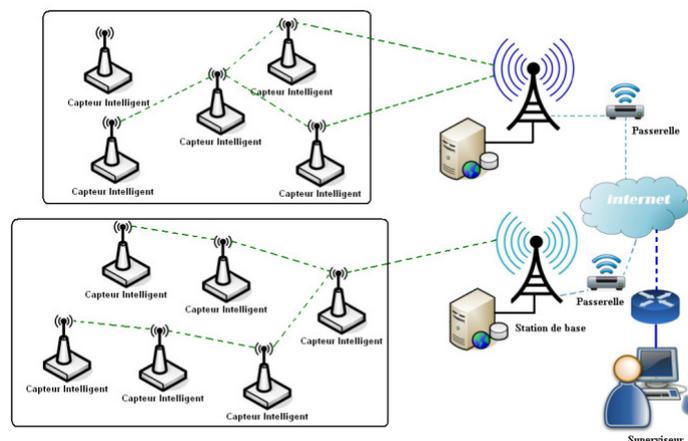


Figure I.6 Communication multi-sauts ou coopérative dans un RCSF

Les capteurs autonomes distribués dans l'espace doivent coopérer en formant un réseau de capteur sans fil maillé pour accomplir une tâche de détection globale demandée. Chacun de ces nœuds ne doit pas seulement collecter et diffuser ses propres données à la station passerelle, mais aussi servir de relai pour transférer les données de ses voisins qui sont plus proches par une liaison multi-sauts. La station de base transmet ensuite ces données par Internet ou par satellite à l'ordinateur central gestionnaire de tâches pour analyser ces données et prendre des décisions. Les paquets de données se propagent point à point en collaboration depuis le capteur source jusqu'à ce qu'ils arrivent à la station de base. Ce problème de routage, qui est la tâche de trouver un chemin multi-sauts d'un nœud de capteur à la station de base, est l'un des défis les plus importants. Il a reçu

une immense attention de la communauté de recherche [9-16]. Cependant, cette architecture a l'inconvénient de la forte consommation d'énergie par les nœuds de capteurs pendant l'envoi des paquets de données vers la station de base. Pour résoudre ce problème, les nœuds de capteurs sont regroupés en un certain nombre dans de petits ensembles nommés Clusters ou groupements. Ce sont l'unité d'organisation pour les réseaux de capteurs sans fil. Chaque groupement a un nœud coordinateur appelé chef de cluster CH et des nœuds membres qui lui sont attachés. Les CHs sont nécessaires pour organiser des activités dans le cluster comme l'agrégation des données et la direction des paquets délivrés avec succès vers d'autres CHs dans le réseau dans le but d'assurer des communications fiables entre chacun. Cette opération a pour principal but de limiter le trafic sur le réseau. La figure I.7 illustre cette topologie [7, 11, 15, 16-20].

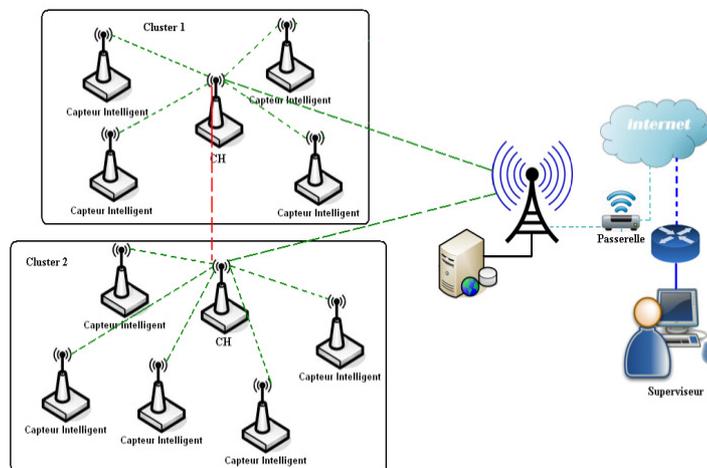


Figure I.7 RCSF avec Clustering

Le clustering donc est un mécanisme important qui offre, pour un large réseau de capteurs, les avantages suivants :

- ✓ l'évolutivité ;
- ✓ la réduction de la consommation d'énergie ;
- ✓ l'augmentation du nombre de paquets de données ;
- ✓ le prolongement de la durée de vie du réseau ;
- ✓ la diminution du temps de retard de l'envoi des paquets de données dans le réseau ;

Actuellement de nombreux réseaux de capteurs sont déployés sur terre, sous terre et sous l'eau. Le tableau I.2 présente cinq types de réseaux de capteurs [21].

Tableau I.2 Types des RCSF

Type de RCSF	Caractéristiques
Terrestre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consiste en un grand nombre de nœuds à faible coût déployés sur terre dans une zone donnée d'une manière ad-hoc</li> <li>- Les nœuds peuvent être équipés d'une alimentation secondaire telle que des cellules solaires</li> <li>- Routage multi-sauts optimal, à courte portée de transmission, l'agrégation des données en utilisant les opérations à faible rapport cyclique</li> </ul>
Souterrain	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les nœuds de capteurs sont déployés dans des grottes ou des mines souterraines ou à surveiller les conditions souterraines</li> <li>- Utilisation de nœuds supplémentaires sont situés au dessus du sol pour acheminer les données à la station de base</li> <li>- Plus cher pour assurer une communication fiable à travers le sol, les roches et l'eau avec forte atténuation et perte du signal</li> </ul>
Sous-marin	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capteurs déployés sous l'eau, dans l'environnement océanique, marin, fluvial</li> <li>- Plus cher, nécessite des véhicules sous-marins autonomes pour explorer ou de recueillir les données</li> <li>- Communication sans fil utilise des ondes acoustiques ayant une bande passante limitée, long délai de propagation, une latence élevée et évanouissement du signal</li> <li>- Les nœuds doivent être capables de s'auto-configurer et s'adapter aux conditions ambiantes</li> </ul>
Multimédia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ce compose de nœuds à faible coût équipés de caméras et de microphones, déployés d'une manière pré-planifiées pour assurer une couverture</li> <li>- Les nœuds sont capables de stocker, de traiter et de récupérer les données multimédias comme la vidéo, audio et des images</li> <li>- Nécessite grande bande passante, forte consommation d'énergie, une qualité de service acceptable, des techniques de compression de données</li> </ul>
Mobile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se compose de nœuds mobiles qui peuvent se déplacer et d'interagir avec l'environnement physique</li> <li>- Nécessite un algorithme de routage dynamique pour gérer, contrôler et localiser la mobilité</li> </ul>

## V. Standards et protocoles de communication

La propagation et la délivrance des données dans un RCSF représentent la fonctionnalité la plus importante du réseau. L'opération de traitement de données par le microcontrôleur et la communication sans fil sont les principales causes de la consommation d'énergie. La puissance utilisée pour transmettre un seul bit est égale à la quantité de consommation pour traiter des milliers de commandes. Alors la connectivité, qui dépend essentiellement de l'existence des routes entre les nœuds, consiste un problème majeur dans les réseaux de capteurs. Elle est affectée par les changements de topologie dus à la mobilité, la défaillance des nœuds, les attaques, etc. Ce qui a comme conséquence : la perte des liens de communication, l'isolement des nœuds, le partitionnement du réseau, diminution de la durée de vie du réseau, etc.

Depuis que la communication dans les RCSF est très coûteuse, une attention particulière lui est accordée pour adapter les mécanismes de communication afin d'assurer le bon fonctionnement des

applications : durée de vie, fiabilité, temps de réponse, qualité de services, etc. Un nombre important de recherches et d'approches sont orientées vers les protocoles de communication dans les RCSF et différentes études ont été publiées dans ce sens [7, 10, 11, 19].

## V.1 Protocoles de communication

Dans la littérature, ces protocoles sont classifiés de manières différentes selon plusieurs critères, mais les plus célèbres sur lesquels s'articulent les travaux de recherche récents sont cités sur le tableau I.3 suivant [7, 10, 11, 17, 18].

Tableau I.3 Avantages des protocoles de communication des RCSF

Protocole	Rôle	Avantages
<b>Protocoles MAC</b>	Gestion d'accès au canal de transmission économe en énergie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suppression des pertes d'énergies dues aux collisions des paquets et à l'écoute radio</li> <li>- Assurance d'une meilleure performance du canal de transmission</li> <li>- Performance en débit de transmission</li> <li>- Optimisation de la latence</li> </ul>
<b>Protocoles de routage</b>	Acheminement des informations tout en minimisant la consommation énergétique en absence d'infrastructure fixe du réseau	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fiabilité de transmission depuis l'émetteur vers le récepteur</li> <li>- Prolongement de la durée de vie du réseau</li> <li>- Maximiser le trafic de paquets de données</li> </ul>

### V.1.1 Protocoles MAC

Le rôle principal des protocoles MAC est de réguler l'utilisation du support, et ceci est fait par un mécanisme d'accès au canal qui divise la principale ressource (le canal radio) entre les nœuds. Il indique à chaque nœud où il peut transmettre et quand il est prévu pour recevoir des données. Ce mécanisme est le noyau du protocole MAC. Cela permet la transmission sans collision et économise de l'énergie. En effet, des nœuds peuvent être éteints automatiquement quand ils ne sont pas impliqués dans une opération d'envoi ou de réception. Ce type de protocole caractérisé par son adaptabilité aux changements de topologie du réseau, est conçu pour surmonter les raisons de gaspillage de l'énergie [7, 11, 19, 20] :

- ✓ Collision;
- ✓ Écoute au repos (idle);
- ✓ Contrôle de paquets overhead;
- ✓ etc. ;

### V.1.2 Protocoles de routage

Les protocoles de routage utilisés dans les RCSF pour l'acheminement des données entre les nœuds et la station de base tout en optimisant la consommation énergétique, peuvent être classés en trois catégories :

#### 1) Protocoles basés sur les opérations du réseau [6, 7, 11, 13, 17, 18]

- ✓ *Les protocoles de routage multi-trajets* : plusieurs voies sont découvertes entre la source et la destination et sont utilisées pour fournir une route de secours. Lorsque le chemin primaire échoue, la sauvegarde est utilisée ce qui augmente les performances du réseau, au détriment de l'augmentation du coût de la consommation d'énergie et la génération de trafic;
- ✓ *Les protocoles basés sur la requête* : le nœud de destination envoie des requêtes demandant des données à partir de certains nœuds dans le réseau. Si un nœud a des données qui correspondent à la requête, il les envoie vers le nœud demandeur. Ce processus est connu comme dirigé diffusion;
- ✓ *Les protocoles basés sur la négociation* : supprimer les informations en double et empêcher les données redondantes d'être envoyées au capteur suivant ou à la station de base en effectuant une série de messages de négociation avant le début de la transmission de données réelles;
- ✓ *Les protocoles basés sur la QoS* : le réseau a un équilibre entre la consommation d'énergie et la qualité des données. En particulier, le réseau doit satisfaire à certaines mesures de qualité de service (délai, l'énergie, bande passante, ...) lors de la livraison des données à la station de base;

#### 2) Protocoles basés sur la structure du réseau [7, 11, 13, 17, 18]

- ✓ *Les protocoles plats (flats)* sont simples, robustes et faciles à étendre : tous les nœuds sont semblables en termes de ressources et possèdent le même rôle. Il n'y a pas de nœuds de gestion du réseau;
- ✓ *Les protocoles hiérarchiques* utilisant le regroupement (clustering) : les nœuds sont divisés en plusieurs niveaux de responsabilité avec des CHs et leurs membres;
- ✓ *Les protocoles basés sur la localisation* : les positions des nœuds représentent le moyen principal d'adressage et de routage. Dans certaines applications, il est plus intéressant

d'interroger le système en utilisant les positions des nœuds, que par leurs adresses IP. Dans ce cas, le routage s'effectue grâce à des techniques géométriques afin d'acheminer l'information d'une zone géographique vers une autre;

### 3) Protocoles basés sur les voies de communication traitées au sein du réseau [7, 11, 13, 17, 18]

- ✓ *Les protocoles proactifs* : tous les chemins provenant des sources vers la station de base sont régulièrement calculés avant qu'ils soient réellement demandés. Ces routes sont stockées dans une table de routage de chaque nœud du réseau. Une certaine quantité du trafic de contrôle, sera nécessaire pour maintenir les tables de routage à jour et cohérentes sur l'ensemble du réseau;
- ✓ *Les protocoles réactifs* : les chemins sont acquis par des nœuds à la demande lorsque les données doivent être transmises. Pas de chemin vers la destination est actuellement connu au départ. Chaque fois qu'une station de base veut communiquer avec un nœud particulier, les chemins sont calculés et le meilleur chemin sera sélectionné pour la transmission de données;
- ✓ *Les protocoles hybrides* : combinent les caractéristiques des protocoles proactifs et réactifs. Le réseau est divisé en régions ou en zones spécifiques. La distribution des données dans une zone est dirigée par un tableau (proactif). Quand un nœud doit transmettre des données à un nœud d'une autre zone, cette transmission est accomplie grâce à une demande (réactive) faite à l'avance;

## V.2 Standards de communication

La collecte efficace de données en vue d'une analyse en temps réel à distance par l'instrumentation intelligente et des systèmes de contrôle est assurée par des liens de communications modernes (filaire ou sans fil) persistants et fiables. Ces communications utilisent des liaisons série, dans lesquelles les données sont transmises en séquence sur un seul circuit [3, 11, 12, 19-22]. Parmi les moyens de transmission usuels, le tableau I.4 résume quelques technologies les plus répandues ayant une courte portée de couverture, les autres sont des réseaux cellulaires (2,5G et 3G) ayant une longue portée de transmission. Néanmoins, elles présentent plusieurs contraintes de coût, de couverture réseau, et de forte consommation en énergie.

Tableau I.4 Standards de communication pour les capteurs intelligents

Standards	Communication	Avantages	Applications
<b>CAN</b>	Câblée ou sans fil	- Transfert rapide de données entre plusieurs appareils électroniques avec efficacité et sécurité	Industrie, automobile
<b>HART</b>	Câblée ou sans fil	- Fiable - Permet la mise en service et la calibration des équipements intelligents - Permet le diagnostic continu en ligne	Industrie
<b>Fieldbus</b>	Câblée	- Réseau de communication haut débit avec plusieurs appareils simultanément dans un seul câble - Auto-reconnaissance et diagnostic des équipements - Moins coûteux	Industrie
<b>Powerlink</b>	Câblée ou sans fil	- Configurer les appareils - Diagnostic, dépannage des appareils - Communication en temps réel vers un système de commande	Industrie
<b>Ethernet TCP/IP</b>	Câblée ou sans fil	- Transfert rapide de données - Synchronisation - Servir un grand nombre de nœuds	Industrie, domestique, surveillance
<b>ZigBee</b>	sans fil	- Prise en charge de plusieurs topologies réseau avec longue portée - Déploiement dans des environnements hostiles - Faible consommation d'énergie - Évite les collisions	Industrie, surveillance, domestique
<b>Bluetooth</b>	sans fil	- Franchissement d'obstacles	Domestique, personnel
<b>UWB IR-UWB</b>	sans fil	- Faible consommation d'énergie - Bonne bande passante	Industrie, surveillance, domestique
<b>Wi-Fi</b>	sans fil	- Portée acceptable - Grande bande passante	Industrie, Surveillance, domestique
<b>GPRS</b>	sans fil	- Longue portée	Surveillance, Web, localisation
<b>Wi-Max</b>	sans fil	- Longue portée - Grande bande passante	Surveillance, multimédia
<b>RFID</b>	sans fil	- Ne demande pas une alimentation électrique - Portée acceptable	Industrie, commerce, surveillance, domestique

### V.3 Métriques de performance

Pour évaluer et mesurer les performances d'un réseau de capteurs intelligents, un ensemble d'indicateurs sont nécessaires. La figure I.8 schématise les principales métriques utilisées dans les travaux de recherche [7, 11, 13, 19].

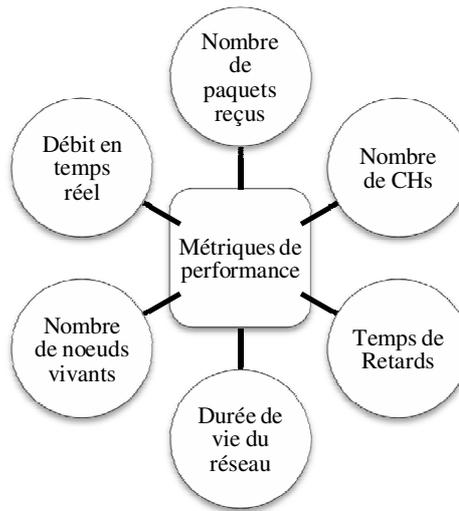


Figure I.8 Indicateurs de performance de RCSF

## VI. Limitations et défis

Le tableau I.5 donne un aperçu général sur les principales contraintes influençant les performances d'un réseau de capteurs intelligents ainsi que les importants défis à surmonter par ces systèmes [3, 7, 10, 11, 14, 23].

Bien que les systèmes à base des capteurs intelligents avec leurs dernières innovations technologiques aient montré un progrès important dans de nombreux champs d'application, ils ont également exposé plusieurs limitations techniques qui doivent être améliorées. En effet, la conception d'un tel système dépend fortement des objectifs de l'application. En outre, il faut tenir compte de plusieurs facteurs décisifs tels que les contraintes de l'environnement, le coût, le matériel, l'énergie, etc. conduisant à des protocoles et à des algorithmes de gestion des réseaux de ces systèmes distribués.

Plusieurs auteurs abordent une variété de défis majeurs qui se posent dans la conception, l'analyse et le déploiement de réseaux de capteurs sans fil, inclus les protocoles pour les réseaux à grande échelle, le stockage de données et les techniques de compression, les architectures et les mécanismes de sécurité et les applications pratiques. En plus de la mise en réseau, la gestion des données est un enjeu important compte tenu des volumes de données qui sont générés par les nœuds de capteurs [7, 11, 23-25].

Tableau I.5 Défis et contraintes des capteurs intelligents

Contrainte	Spécifications et défis
<b>Réseau très dense</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redondance de paquets : spatiale (proximité) et temporelle (observation consécutive)</li> <li>- Surcharge du réseau</li> <li>- Identification de nœuds</li> <li>- Assurer la fiabilité et la disponibilité du réseau</li> <li>- Gérer la périodicité de l'envoi des données</li> </ul>
<b>Ressources limitées</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Calcul distribué: acquisition, fusion ou agrégation, traitement localisé des données</li> <li>- Mémoire</li> <li>- Energie : remplacement de la batterie est impossible</li> <li>- Système de base de données : augmenter le nombre de requêtes exécutables par unité de temps, minimiser le temps écoulé pour répondre à une requête</li> <li>- Nœuds épuisés provoquent la perte de connectivité ou de couverture</li> <li>- Maximiser la durée de vie du réseau</li> <li>- Récupération de l'énergie environnante : solaire, vibration, thermique, piézoélectrique, etc.</li> </ul>
<b>Communication</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réseaux de standards hétérogènes : média de transmission doit être normé</li> <li>- Interférence et parasites au canal</li> <li>- Taux d'erreur binaire élevé</li> <li>- Multi-sauts ou multi trajectoires : retards</li> <li>- Protocoles de routage optimaux et efficaces, localisation précise</li> <li>- Exigences de qualité de service QoS par une application</li> <li>- Nécessité de synchronisation du temps</li> <li>- Intégration avec Internet et d'autres réseaux</li> </ul>
<b>Contraintes environnementales</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Taille des capteurs</li> <li>- Zone inaccessible, dangereuse, hostile</li> <li>- Régions géographiques éloignées</li> <li>- Déploiement aléatoire difficile: perte de nœuds de capteurs</li> </ul>
<b>Infrastructure</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Change selon l'application</li> <li>- Demande une auto-organisation précise</li> <li>- Topologie change à cause des pannes, mobilité</li> </ul>
<b>Sécurité</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Environnement non-contrôlé</li> <li>- Absence d'un tiers de confiance</li> <li>- Présence d'intrus menant des attaques : <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ passives les écoutes sur les transmissions, l'analyse du trafic, la divulgation de contenu du message</li> <li>▪ actives: la modification, la fabrication, et l'interruption, déni de service</li> </ul> </li> <li>- Capture des nœuds</li> <li>- Cryptage gourmand en énergie</li> <li>- Stockage des clés</li> <li>- Adapter les mécanismes de sécurité avec le routage et détection d'intrusion</li> </ul>
<b>Défaillances</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tolérance vis-à-vis des pannes</li> <li>- Nécessité de technique de détection de défaillance logicielle et matérielle</li> <li>- Système d'exploitation devrait équilibrer le compromis entre l'énergie et les exigences de qualité de service</li> <li>- Maintenir les fonctionnalités du réseau sans interruptions</li> </ul>

La consommation de l'énergie, principalement dissipée par l'électronique des nœuds, le conditionnement du signal et par les communications, peut être surmontée par l'optimisation et

l'amélioration, à tous les niveaux de la hiérarchie, des protocoles de gestion du réseau qui offrent une grande évolutivité sans modifier le principe de conception.

C'est pour cette raison que les recherches actuelles se concentrent principalement sur les moyens de réduire les coûts énergétiques et de prolonger la durée de vie du réseau à fonctionner pour une longue période dans tels environnements tout en maintenant une bonne qualité de service et en gardant une connectivité permanente [3, 7, 11, 20, 22].

Malgré leurs limitations, les capteurs intelligents offrent un énorme avantage sociétal. Ils sont intégrés dans de nombreux appareils et machines. Ils peuvent aider à éviter des défaillances catastrophiques, préserver les ressources naturelles précieuses, augmenter la productivité, améliorer la sécurité et permettre de nouvelles importantes applications telles que la surveillance de l'environnement et la supervision des machines industrielles à distance et le suivi de cibles. Le tableau I.6 résume les principales applications des capteurs intelligents [1, 2, 7, 11, 14, 22, 24, 26-29].

Tableau I.6 Types d'applications des capteurs intelligents

Surveillance d'environnement	Poursuite ou localisation	Surveillance et sécurité	
		Détection d'événements	Détection périodique
Collecter périodiquement des données environnementales issues de plusieurs types de capteurs puis les transmettre vers une station de base	Suivre un objet cible mobile dans un lieu contrôlé par un réseau de capteurs	Réagir immédiatement à des changements soudains et donner des réponses rapides à l'occurrence d'un certain nombre d'évènements captés	Prélèvement périodique des données afin d'établir des rapports
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection de pollutions</li> <li>- Radiologique, nucléaire</li> <li>- Gestions des catastrophes: prédiction, sismique, volcanique, inondations</li> <li>- Secours</li> <li>- Incendies de forêts</li> <li>- Météo</li> <li>- Rayonnement solaire</li> <li>- Vitesse du vent</li> <li>- Contrôle et gestion de déchets</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Détection des bords ou des frontières</li> <li>- Biomédicale, soins de santé</li> <li>- Militaire</li> <li>- Circulation</li> <li>- Détection d'intrusions</li> <li>- Logistique et transport</li> <li>- La marine : pêche</li> <li>- Contrôle de la durée de vie des produits</li> <li>- Le pâturage du bétail</li> <li>- Contrôle des animaux</li> <li>- L'élevage de bétails</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Automobiles et véhicules</li> <li>- Industrie</li> <li>- Contrôle de gaspillage</li> <li>- Contrôle de fuites</li> <li>- Maintenance préventive</li> <li>- Domotique</li> <li>- Biomédicale, soins de santé</li> <li>- Militaire</li> <li>- Circulation</li> <li>- Incendies</li> <li>- Mouvements, acoustique</li> <li>- Détection d'intrusions</li> <li>- Logistique et transport</li> <li>- Administration</li> <li>- Energies renouvelables</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Agriculture</li> <li>- Industrie</li> <li>- Maintenance préventive</li> <li>- Diagnostic d'anomalies ou de défauts</li> <li>- Biomédicale, soins de santé</li> <li>- Contrôle d'édifices : structures, habitat, bâtiments, Parkings, barrages</li> <li>- Militaire</li> <li>- Circulation</li> <li>- Logistique et transport : flux de trafic</li> <li>- Réseaux intelligents</li> <li>- Systèmes de contrôle de l'énergie</li> <li>- Energies renouvelables</li> </ul>

Pour ces systèmes, la méthode de captage des données dépend de l'application et de l'importance de ces données. Ainsi, il existe trois grandes classes de réseaux de capteurs selon leurs applications : réseau de collection des données d'environnements, réseau de surveillance et sécurité et enfin le réseau de poursuite.

Dans cette optique, plusieurs axes et approches pertinentes sont explorées et d'autres peuvent être investiguées comme perspectives de recherche [3, 7, 8, 11]:

- La récupération de l'énergie environnante et l'exploitation des énergies renouvelables et sans fil ;
- Amélioration des systèmes à capteurs inductifs ou des RFID ayant la capacité de mesurer et de détecter sans fil sans utiliser d'alimentation ;
- Garder l'électronique des nœuds inactive la plupart du temps ;
- Optimiser la tension et la fréquence d'horloge de CPU des nœuds ;
- Intégrer un système complet sur une seule puce électronique à faible consommation d'énergie avec une architecture radio-fréquence multi-standards ;
- Filtrer localement les données détectées en éliminant les informations redondantes et ne transmettre que celles traitées : seule l'information nécessaire est transportée ;
- Amélioration des techniques radio-modulation pour réduire les interférences et pour augmenter la fiabilité du système ;
- Amélioration des protocoles de routage par les méthodes méta-heuristiques, les méthodes d'intelligence artificielle comme la logique floue, réseaux de neurones et les méthodes d'optimisation inspirés de la nature pour un fonctionnement en temps réel en prenant compte de l'effet de mobilité ;
- Améliorer la sécurité du réseau contre les menaces d'intrusions ;
- Mise en place d'une approche de détection des défaillances des capteurs intelligents et la réaction face à leur évolution au cours du temps ;
- Étudier le comportement des RCSF en temps réel avec des modèles analytiques ;
- La recherche d'autres domaines d'applications des systèmes à base des capteurs intelligents;
- L'investigation d'améliorer les capteurs intelligents sous marins et leur applications ;
- L'amélioration de performances des méthodes de traitement du signal appliquées dans les capteurs intelligents en termes de complexité, temps de calcul et taille mémoire requise ;

- Développement d'environnements intelligents offrant des services améliorés à travers un paradigme basé sur l'apprentissage et sur la prévision ;
- Amélioration des techniques de localisation utilisées dans les RCSF pour augmenter la précision des trajectoires de paquets dans le but de minimiser la consommation d'énergie et de réduire les retards de communication ;

Les capteurs intelligents sont des objets communicants ayant la fonctionnalité d'échanger les données avec leur environnement. Cependant, la diversité des protocoles de communication et leur convenance avec les applications dans lesquelles ces capteurs seront implantés et employés forme un vrai challenge. Le chapitre suivant traite et discute en détails la résolution de ce problème.

# Analyse comparative de performances des protocoles de communication sans fil

## I. Problématique de la performance des protocoles

La communication sans fil, offre avec sa diversité, une meilleure solution pour le trafic de données entre systèmes à base de capteurs intelligents. En effet, plusieurs technologies sans fils sont apparues ces dernières années. Elles permettent de nombreuses applications en plus des communications vocales classiques et le transfert de données à haut débit. Elles sont largement utilisées dans le domaine de la métrologie à distance surtout dans les technologies à base des capteurs intelligents ou les systèmes embarqués autonomes. L'insertion de la communication sans fil dans un système à base de ces capteurs offre plusieurs avantages :

- Faciliter le trafic d'informations sur plusieurs centaines de mètres à quelques kilomètres sans câblage ;
- Réduire le coût de connexion dans les réseaux de grande taille ;
- Gérer des situations où la mobilité est essentielle et les fils ne sont pas pratiques ;

Aujourd'hui, l'émergence des technologies de transmission sans fil radiofréquence permet de réduire le câblage des connexions voire le supprimer. Chacune de ces technologies est caractérisée par sa fréquence d'émission, son débit et sa portée de transmission.

Certes, la conception de la partie de communication d'un capteur dépend de la dimension des informations à recueillir par ce capteur. Cela impose à l'utilisateur de le configurer pour tout fonctionnement désiré. Il est donc absolument essentiel que cette interface de communication (module radiofréquence) soit robuste et fiable. La figure II.1 illustre schématiquement un capteur intelligent avec un module de communication sans fils [30, 31]. Plusieurs interfaces de communication sans fils sont disponibles, mais elles ne sont pas toutes compatibles à tout système. Le concepteur doit sélectionner l'interface qui fournit la meilleure intégration avec les autres éléments de son système. Il doit veiller à ce que les contraintes de coût et de fiabilité nécessaires soient respectées.

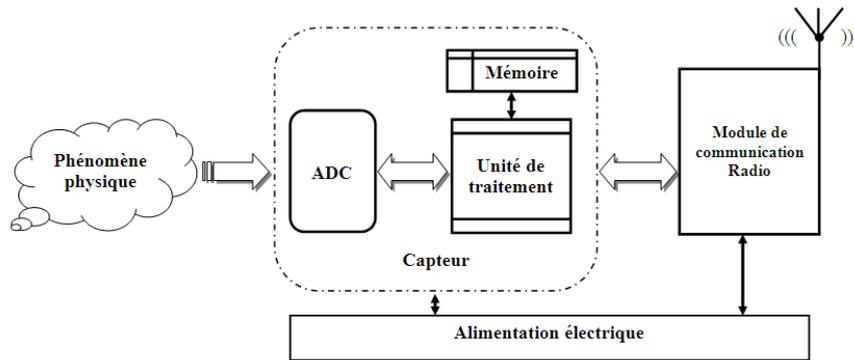


Figure II.1 Capteur intelligent et interface de communication

Ces contraintes imposées par son application représentent souvent une réalité à assurer. Leur violation affecte la qualité de communication. Ces contraintes peuvent être résumées comme suit [122], [123] :

- Portée;
- Fiabilité;
- Débit;
- Conformité (normes);
- Sécurité;
- Coût;
- Consommation d'énergie;
- Vitesse et type de transmission (dynamique de réponse, synchrone ou asynchrone);
- Architecture de réseau envisagé (topologie);
- Environnement (Multi-trajet, interférences, bruits, obstacles, climat, hypsométrie), etc. ;

D'autres solutions, que celles des réseaux de capteurs, sont possibles pour collecter les mesures à distance. Elles peuvent être la téléphonie mobile, la communication par satellites, etc.

Dans la littérature, de nombreux travaux de recherche ont été réalisés sur les réseaux de capteurs sans fils. Ils sont faits dans le but d'améliorer les protocoles de communication afin de résoudre la contrainte d'énergie, d'assurer la sûreté de fonctionnement, d'augmenter le niveau de sécurité, de réaliser la bonne précision, d'augmenter la rapidité du trafic des données, de favoriser l'autonomie, de certifier la fiabilité et la rentabilité [124-127]. La communication sans fils dans les réseaux de capteurs intelligents reste un domaine très fertile pour la recherche et l'innovation. Elle constitue un défi scientifique et technologique dans la mesure où la topologie et l'infrastructure de ces réseaux dépendent fortement de type de l'application à envisager surtout

en termes d'encombrement de ses équipements, de temps de sa synchronisation, de sa QoS et de son routage.

Ci-après, on a fait une analyse comparative des paramètres influençant la performance et la qualité d'une communication sans fils dans un système à base des capteurs intelligents. En effet, on a pris en considération des critères du coût et les exigences de la réalisation de ce système.

On peut classer les exigences des applications à base des capteurs intelligents en trois catégories, voir le tableau II.1 [30]. Chaque application a des exigences sur son système de communication. Par exemple, pour les applications de collecte de données d'environnement ainsi que pour celles de sécurité, la connectivité et l'efficacité du réseau doivent avoir un cycle de vie relativement long. Cependant, ce cycle ne peut pas être illimité, car pour préserver longtemps la qualité de services de chacun de ces réseaux, il est indispensable de remplacer régulièrement les nœuds défectueux. Cela entraînerait un coût de maintenance élevé. Cette condition est très difficile voire inconcevable. D'autres exigences sont apparues également telles que l'efficacité énergétique dans les protocoles de communication [123-128], l'optimisation du routage des données, le contrôle de l'envoi inutile des données, la diminution des collisions [124-126], etc.

Tableau II.1 Besoins en fonction des applications

	<b>Exigences de surveillance d'environnement</b>	<b>Exigences de détection d'événements</b>	<b>Exigences de localisation (ou Tracking)</b>
<b>Spécifications et besoins</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mesure et envoi réguliers</li> <li>- Traitement de peu de données</li> <li>- Longue autonomie</li> <li>- Connexion permanente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Génération de message d'alerte</li> <li>- Confirmation d'état</li> <li>- Traitement de peu de données</li> <li>- Connexion permanente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mobilité</li> <li>- Traitement de peu de données</li> <li>- Coordonnées de localisation</li> <li>- Connexion permanente</li> </ul>
<b>Domaine d'application</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Volcanisme</li> <li>- Sismologie</li> <li>- Habitat</li> <li>- Pollutions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Volcanisme, sismologie</li> <li>- Intrusion</li> <li>- Gestion de parking</li> <li>- Supervision Industrielle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Localisation et suivi d'objet</li> <li>- Médical, localisation de personnes malades</li> </ul>

Ces exigences mettent l'accent sur les indicateurs de performance des protocoles de communication sans fils. Ces indicateurs permettent de bien s'informer de la qualité de service d'un protocole, de sa précision, de sa fiabilité, etc.

Cette classification vue au tableau II.1 entraine le recours à une grande diversification de standards et de normes de communication sans fils, très similaires parfois et compatibles autre fois. On s'intéresse dans ce travail à trouver un compromis rentable permettant de trouver le protocole sans fils approprié et optimal en terme de fiabilité pour une application donnée [129-131].

## II. Nouvelles contraintes des systèmes de capteurs intelligents

La réalisation des réseaux de capteurs dédiés aux domaines d'application cités précédemment, exigent des techniques et des protocoles spéciaux. Ces exigences prennent nécessairement en compte les spécificités de ces réseaux, car les techniques conçues pour les réseaux informatiques ad-hoc traditionnels, ne sont plus adaptées aux réseaux de capteurs sans fils. Les différences entre eux sont décrites ci-dessous :

- Dans les réseaux de capteurs, les nœuds sont déployés en un grand nombre et avec une densité variable ;
- Les réseaux de capteurs ne sont pas fiables à tout moment, les nœuds peuvent être défaillants ou inhibés ;
- La topologie des réseaux de capteurs change fréquemment ;
- Les réseaux de capteurs utilisent principalement le paradigme de communication-diffusion tandis que les réseaux ad-hoc sont basés sur le paradigme de communication point-à-point ;

Par ailleurs, les systèmes aux capteurs intelligents ont des avantages tels que leur topologie facile à déployer avec un faible coût, leur capacité de détection dans un environnement difficile, etc. Cependant, ces capteurs présentent des limitations en consommation d'énergie, en capacité de calcul, en étendu de couverture de la zone surveillée et en mémoire. En plus, ils ont besoin de sécurité en termes de confidentialité de données et en termes des techniques de cryptage et de compression.

Dans tout développement des réseaux de capteurs, on doit en effet prendre en compte leurs caractéristiques, leurs spécificités et leurs exigences. Par exemple, dans les réseaux ad-hoc, la consommation de l'énergie a été considérée comme un facteur déterminant mais pas primordial, car les ressources d'énergie peuvent être remplacées par l'utilisateur. Dans ces réseaux, on s'intéresse plus à la QoS qu'à la consommation de l'énergie. Par contre, dans les réseaux de capteurs sans fils, la consommation d'énergie et le temps de synchronisation sont deux métriques de performance très importantes, car ces capteurs sont déployés dans des zones inaccessibles [124].

### II.1 Influence de la topologie

Les réseaux de capteurs sans fils sont déployés dans des environnements très variés. Cette diversité dans leur topologie nécessite divers algorithmes de routage géographique [132], car la mise en œuvre de leurs protocoles dépend de la position des nœuds dans ces réseaux. En effet,

chaque nœud pourra choisir parmi ses voisins celui qui est le plus proche de la destination comme intermédiaire, pour véhiculer ses paquets de données. Par conséquence, les nœuds les plus lointains de la station de base consomment plus d'énergie dans leurs communications.

Ces nœuds peuvent établir des communications avec ses homologues et avec le serveur du centre de surveillance. Ces communications peuvent être directes ou par l'intermédiaire d'Internet à travers un réseau GPRS, un réseau Wi-Max ou par une liaison satellitaire. Cela est illustré sur la figure II.2.

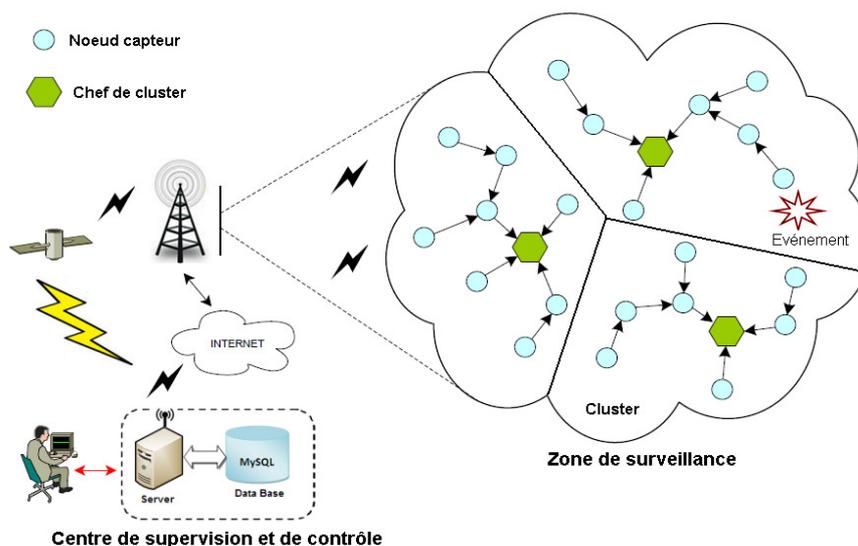


Figure II.2 Topologie hybride pour les RCSF

Dans ce contexte, il est possible de mettre en place des applications de surveillance ciblant une zone de captage très vaste de quelques kilomètres carrés. Cela augmente le temps de retards dans les communications. Peu de recherches ont été orientées vers l'étude de l'impact de la topologie des réseaux sur les performances des protocoles dans les RCSF.

Puisqu'un système à base de capteurs intelligents est constitué de plusieurs nœuds, sa topologie réseau est un facteur décisif dans sa conception, car elle influence fortement sur les performances du système relatif et sur ses capacités. Les topologies réseau communes les plus utilisées par ces systèmes sont en étoile, maillée, arborescente ou hybride qui combine les entre autres. Chaque topologie présente des avantages et des limitations comme comparé sur le tableau II.2 [133].

Tableau II.2 Topologies des réseaux de capteurs et leur usage

Topologie	Consommation en puissance électrique	Portée de communication	Exige temps de synchronisation	Utilisation
Etoile	Faible	Courte 10-100 m	Non	Petits réseaux avec une passerelle centrale de coordination
Arborescente	Faible	Longue > 100 m	Oui	Grands réseaux hiérarchiques avec un nœud racine
Maillée	Elevée	Longue > 100 m	Non	Grands réseaux hiérarchiques avec communication multi-sauts et multi-chemins entre nœuds voisins et passerelle
Hybride	Typiquement faible	Longue des kilomètres	Dépend de la configuration	Grands réseaux hiérarchiques avec communication hybride optimisée et auto-configuration

## II.2 Impact de la hiérarchie du réseau

La structure des RCSF basée sur les groupements (clusters) était proposée pour réduire le coût et la complexité de fonctionnement du réseau, ainsi pour prolonger sa durée de vie. Cette configuration par clusters a donné naissance à une communication hiérarchique de deux niveaux. En effet, ces réseaux sont composés au moins de deux types des nœuds. Ces membres qui collectent les données de l'environnement où ils sont déployés et leurs chefs de groupements CH qui sont responsables non seulement de fonctionnalités habituelles mais aussi de recueil et d'agrégation des données récoltées par leurs membres. Cette diversité de rôles et de fonctions entre les nœuds affecte, d'une façon ou d'une autre, les performances du réseau.

Toutefois, certaines applications nécessitent l'introduction d'un autre type de nœuds plus puissants en termes d'énergie et de calcul dans le réseau. Ils sont appelés nœuds avancés. Cette coexistence entre les nœuds à faibles ressources (normaux) et les nœuds riches en ressources (avancés) permet d'approcher les RCSF de la réalité, car les nœuds d'un réseau homogènes, ayant les mêmes capacités d'énergie et de calcul, ne sont pas déployés de la même manière. Ils n'occupent pas la même place, n'exécutent pas les mêmes commandes et ne réalisent pas les mêmes missions de détection. Donc, l'homogénéité demeure un cas idéal qui ne vérifie pas l'équilibre énergétique entre ces nœuds. Alors, l'approche d'hétérogénéité introduit des nouveaux défis de recherche en relation avec les protocoles de routage. Cela est pour un balancement énergétique optimal tout en maintenant la synchronisation [133]. Dans ce contexte, on a proposé trois approches minimisant la consommation d'énergie pour les protocoles de routage hétérogènes SEP et TDEEC et pour le protocole homogène LEACH. La première

consistait à implémenter un algorithme de logique floue pour choisir les chefs de clusters CH. Cela est selon deux critères d'élection (énergie résiduel du nœud candidat et sa distance de la station de base) [134]. La deuxième était basée sur la recherche en proximité des nœuds candidats d'être chefs de clusters CH. Cela est dans tous les clusters. Par la suite, on a formation de nouveaux clusters par élimination des candidats ayant un nombre minimum de membre au voisinage [135]. Tandis que la troisième a permis la récupération de la quantité d'énergie dissipée dans le processus de localisation effectué par les nœuds lors de la phase d'initialisation du réseau [136]. Ces trois méthodes ont montré une perfection considérable des performances du réseau.

Un autre problème, qui pourrait être un sujet de recherche, est la minimisation du nombre de clusters générés par les algorithmes de formation des regroupements. En effet, on a contribué dans ce sens à l'amélioration du protocole de routage TDEEC. On a introduit un algorithme d'optimisation du nombre total des clusters du réseau tout en éliminant les nœuds les plus proches de toute station de base de réseau. Cette élimination dans le mécanisme d'élection de chefs des clusters CH [137, 138] a minimisé l'énergie consommée. Cette technique a donné de meilleurs résultats en termes de prolongement de la durée de vie du réseau et d'augmentation du nombre des paquets de données envoyés par les nœuds. La résolution de ce défi est justifiée par le fait que la bonne répartition des capteurs sur les chefs de clusters peut aboutir à une bonne efficacité énergétique.

### **II.3 Impact du modèle de données**

Contrairement à la topologie, qui est choisie en fonction du protocole gérant un réseau, le modèle de données est une fonction de l'application choisie aussi. Le modèle des données le plus approprié est déterminé en fonction des besoins et des exigences fixées. Il influence directement les performances du système. Autrement dit, l'envoi d'un grand nombre de paquets de données entraîne l'épuisement d'énergie résiduel des nœuds et l'augmentation du temps de retards des communications.

Il existe différents modèles pour les applications de télésurveillance. Dans celles-ci, le flux des données se dirige à partir des nœuds vers la passerelle (station de base). Par contre, pour des applications de contrôle, le flux des données prend le sens inverse de la passerelle aux nœuds. Les modèles des données les plus courants sont résumés dans le tableau II.3. L'utilisation d'un modèle hybride dans lequel une application combine entre un ou plusieurs types de trafic

mentionnés précédemment est possible [133].

Tableau II.3 Modèles de données selon les applications

Modèle des données	Description	Avantages	Besoins
Périodique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les données sont acquises à partir des nœuds et transmises à la passerelle périodiquement</li> <li>- La période d'échantillonnage s'adapte à la variation de l'état de la grandeur capturée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suivre l'évolution d'un processus dans le temps</li> <li>- Rapidité de réaction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande quantité d'énergie</li> <li>- Capacité de calcul très élevée</li> <li>- Connectivité permanente</li> </ul>
Poursuite d'événement	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les nœuds sont au repos avec un temps de réveil court lorsqu'un événement se produit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efficacité énergétique</li> <li>- Rapidité de réaction</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacité de calcul élevée</li> </ul>
Stockage et avancement par requête/réponse	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les données capturées à la demande sont stockées ou traitées par un nœud avant d'être transmises à la passerelle</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Efficacité énergétique</li> <li>- Bonne gestion de bande passante</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacité de mémorisation et de calcul très élevés</li> </ul>

#### II.4 Impact de la sécurité

Comme tout autre système communicant, les RCSF sont vulnérables à des attaques de déni de service. Certes, tout réseau peut être victime d'un dysfonctionnement manipulé. Ses données peuvent être non authentiques. Son trafic peut être entendu dans la diffusion radio. L'altération physique des capteurs et leur destruction sont également possibles surtout en zones non sécurisées. Il peut être parfois, difficile de distinguer entre une attaque et une défaillance du réseau. Ces attaques provoquent aux nœuds, une perte de ressources, qui sont limitées, comme l'épuisement de batteries, la surcharge de bande passante, la saturation de mémoires, etc. Cela conduit à une dégradation des performances de l'ensemble du réseau [133]. Plusieurs travaux de recherche ont été orientés dans ce sens pour remédier à ce problème [8, 139-141].

### III. Communication sans fil

Un protocole est un langage commun intégrant un ensemble de règles et de procédures qui définissent comment établir une communication entre deux clients. C'est aussi une méthode standard qui régit la communication entre des machines où s'exécutent différents programmes, pour émettre et recevoir des données [142]. Toute application à base de RCSF nécessite un protocole de communication simple et flexible en raison de la complexité, de la consommation d'énergie et de coût. Pour cette raison, la standardisation de la communication entre les constituants d'un RCSF et la nécessité de compatibilité logicielle et matérielle, imposent à tout RCSF d'adopter une pile protocolaire constituée de 5 couches. Celles-ci ont les mêmes fonctions

que celles du modèle OSI comme illustré sur la figure II.3. Dans ce modèle, chaque couche communique avec une couche adjacente de niveau bas ou haut. Ainsi, chaque couche exploite les services des couches inférieures et en fournit à celle de niveau supérieur [143].

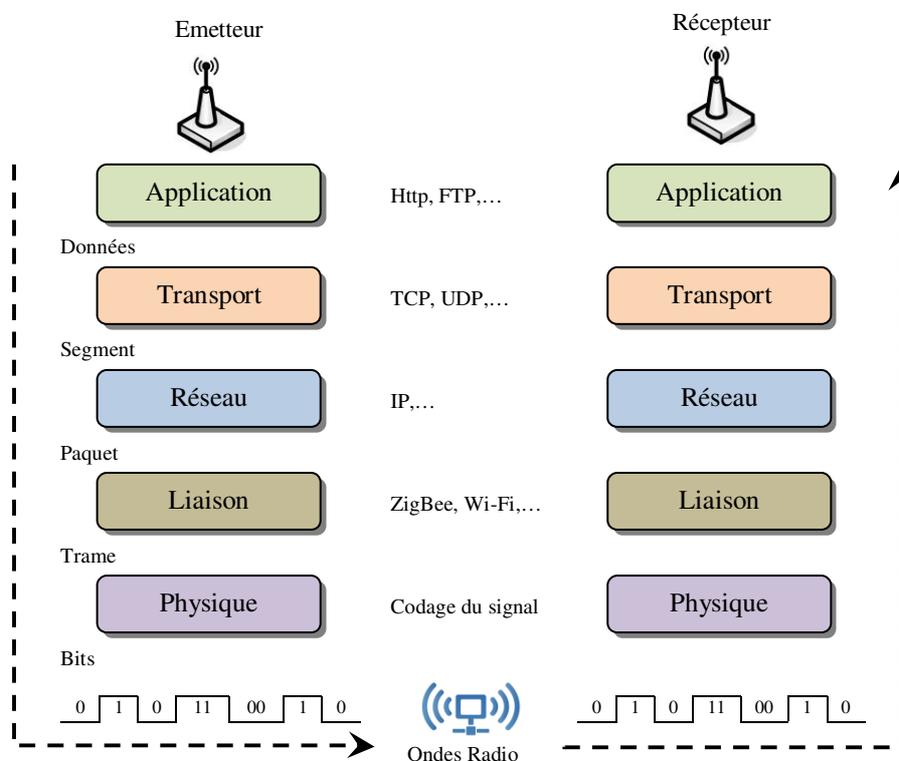


Figure II.3 Communication dans un RCSF selon les couches OSI

Des applications à base des RCSF, conçues pour le suivi permanent des cibles mobiles constituent un vrai challenge. Pour de telles cibles, le seul mode de communication envisageable est celui des réseaux cellulaires (UMTS/3G), mais ceux-ci ne réalisent qu'une couverture incomplète du terrain. Ils sont conçus pour favoriser le trafic descendant du réseau vers l'utilisateur. Leur supervision de cibles mobiles implique que les données transitent de chaque cible vers le réseau. Ces données sont généralement traitées à distance. Les réseaux cellulaires ne sont pas dédiés à la supervision d'état des cibles. Leur disponibilité à transférer les données relatives à cet état, ne peut être garantie et assurée.

Une solution alternative réside dans l'exploitation des autres technologies radio (ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth, etc.). Ces dernières offrent des débits de transfert montants plus importants que les infrastructures cellulaires. Par contre, la contrainte majeure de ces technologies devant la situation de mobilité demeure dans leur faible portée radio. Plus on monte dans le niveau des couches plus on s'approche de l'utilisateur (programmeur), plus l'abstraction entre les données physiques (signal électrique) et logiques (langage de programmation) est lourde.

- *La couche physique* : est responsable des spécifications matérielles, comme la sélection ou la génération de la fréquence porteuse, la détection du signal, la modulation ou le cryptage des données, etc.
- *La couche liaison* : est chargée de multiplexage de flux de données, de la détection de trame de données, d'accès au support et de contrôle d'erreur. Elle assure les connexions fiables point-à-point et celles point à multipoints, dans le réseau.
- *La couche réseau* : se charge de l'acheminement des données fournies par les capteurs vers la couche transport. Ce routage tient compte de manière optimale de l'efficacité énergétique, de la redondance et de l'agrégation des données indiquées, etc.
- *La couche transport* : aide à maintenir le contrôle de flux des données. Elle est chargée de leur découpage en paquets, de la conservation de leur ordre et de la gestion des éventuelles erreurs de transmission.
- *La couche application* : assure l'interface logicielle des utilisateurs avec les applications fonction des tâches de détection.

Pour fonctionner efficacement, le concepteur de tout RCSF doit tenir compte des plans de gestion qui contrôlent l'énergie, de mouvement des nœuds, de la séquence des tâches, de la qualité de service QoS et de la sécurité au sein de tout capteur [144]. Cette approche permet aux nœuds de coordonner les tâches de détection et de collaborer ensemble en partageant les ressources entre eux avec une utilisation efficace de l'énergie disponible. Ainsi, le réseau peut prolonger sa durée de vie et optimiser ses performances.

Dans le processus d'acheminement de données, les messages sont découpés en paquets afin d'en accélérer le transfert. Chaque paquet est composé d'un en-tête contenant des informations sur son contenu et sa destination. Ce sont les adresses nécessaires à son routage. Dans les nœuds du réseau, les paquets sont rassemblés dans des mémoires tampon (buffers) selon un ordonnancement (file d'attente) basé sur des critères désirés. Après analyse des adresses, les paquets sont aiguillés sur des voies de transmission appropriées. A l'arrivée, les messages sont reconstitués à partir des paquets reçus. Cela introduit des variations de latence (retards) et de débit en fonction de la charge de trafic dans le réseau [144, 145].

La fluidité de ce trafic dans tout réseau dépend de type des protocoles utilisés. Dans la section suivante, une étude comparative des protocoles de communication sans fil, les plus répandus et les plus utilisés dans les RCSF, est faite. Ces protocoles sont Bluetooth, UWB, IR-UWB, ZigBee, ZigBeeIP, Wi-Fi, Wi-Max et GSM/GPRS. Ils correspondent aux standards IEEE 802.15.1, 802.15.3, 802.15.4, 802.11a/b/g, 802.16 et 850-900DCS/PCS respectivement [146-

148]. L'IEEE définit les couches PHY et MAC. Il existe dans la littérature, le commentaire de plusieurs travaux de recherche traitant l'amélioration de la performance et de la sécurité de ces protocoles de communication sans fil. En se basant sur les caractéristiques de chaque standard, comme illustré sur le tableau II.4, on remarque que le protocole UWB, Wi-Fi et Wi-Max fournissent un débit de données plus élevé.

Tableau II.4 Comparaison des protocoles de communication sans fil

		Protocoles					
		Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi	Wi-Max	GSM/GPRS
Caractéristiques	Bande de fréquence	2.4GHz	3.1-10.6GHz	868/915MHz; 2.4 GHz	2.4; 5GHz	2.4; 5.1- 66GHz	850/900; 1800/1900MHz
	Débit du signal Max	720Kb/s	110Mb/s	250Kb/s	54Mb/s	35-70Mb/s	168Kb/s
	Portée nominale	10m	10-102m	10 - 100m	10-100m	0.3-49Km	2-35Km
	puissance nominale TX	0 - 10dBm	-41.3dBm/MHz	-25 - 0dBm	15 - 20dBm	23dBm	0-39dBm
	Nombre de canaux RF	79	(1-15)	1/10; 16	14 (2.4 GHz) 64 (5 GHz)	4;8 10;20	124
	Bande de fréquence du canal	1MHz	0.5- 7.5GHz	0.3/0.6MHz; 2MHz	25-20MHz	20;10MHz	200kHz
	Type de modulation	GFSK, CPFSK, 8-DPSK, $\pi/4$ -DQPSK	BPSK, PPM, PAM, OOK, PWM	BPSK QPSK, O-QPSK	BPSK, QPSK, OFDM, M-QAM	QAM16/64, QPSK, BPSK, OFDM	GMSK, 8PSK
	Spreading	FHSS	DS-UWB, MB-OFDM	DSSS	MC-DSSS, CCK, OFDM	OFDM, OFDMA	TDMA, DSSS
	cellule de base	Piconet	Piconet	Star	AP/Ad-hoc BSS	cellular	cellular
	Extension de la cellule de base	Scatternet	Peer-to-Peer	Cluster,star, tree, Mesh	ESS	PTMP, PTCM, Mesh	Cellular system
	Nombre maximum de noeuds de cellules	8	236	> 65000	2007	1600	1000
	chiffrement (Encryption)	E <sub>0</sub> stream cipher	AES block cipher (CTR, counter mode)	AES block cipher (CTR, counter mode)	RC4 stream cipher (WEP), AES block cipher	AES-CCM cipher	GEA, MS-SGSN, MS-host
	Authentication	Shared secret	CBC-MAC (CCM)	CBC-MAC (ext. of CCM)	WPA2 (802.11i)	EAP-SIM, EAP-AKA, EAP-TLS or X.509	PIN; ISP; Mobility Management (GSM A3); RADIUS
	Protection des données	16-bit CRC	32-bit CRC	16-bit CRC	32-bit CRC	AES based CMAC, MD5-based HMAC, 32-bit CRC	GPRS-A5 Algorithm
	Indicateurs de réussite	Coût, convenance	Débit, puissance, coût	Fiabilité, puissance, coût rentable	Vitesse, flexibilité	Débit, vitesse, portée	Portée, coût rentable, convenance,
Applications cibles	Remplacement du câble, services personnels	TV par câble, multimédia, Surveillance, Radar, systèmes médicales	Surveillance et contrôle, RCSF	Réseaux de données, Internet, surveillance, VoIP, FTP	Internet, surveillance, réseaux, services bancaires, Streaming	E-mail, FTP, Web, VoIP, Trafic de données	

Tandis que Bluetooth, ZigBee et GPRS offrent un débit faible. Par contre, on voit que le Bluetooth, l'UWB, le ZigBee sont destinés à la communication WPAN, car la portée de leur couverture n'atteint que 10m. Le Wi-Fi est légèrement distingué avec sa portée d'environ 100m. Il est orienté vers WLAN. Cependant, le Wi-Max et le GPRS permettent un rayon de couverture de quelques dizaines de kilomètres. Ils peuvent être appliqués dans tout réseau WMAN. La figure II.4 résume la différence entre ces protocoles.

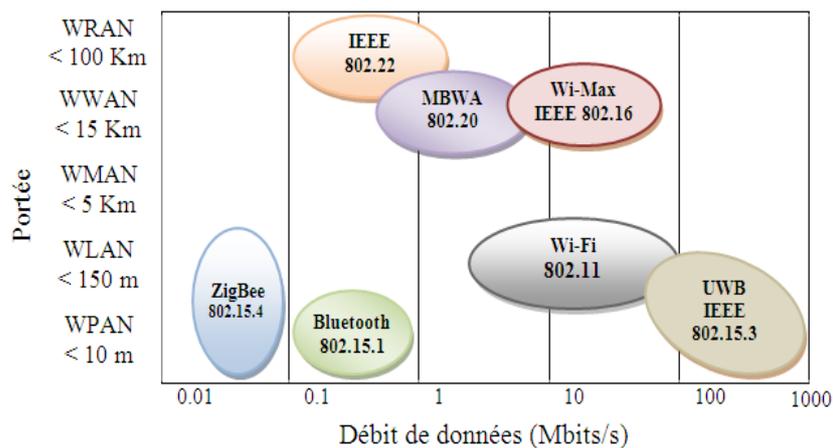


Figure II.4 Protocoles sans fil en fonction de la portée et le débit permis

### III.1 Bluetooth IEEE 802.15.1

Connue avec la norme IEEE 802.15.1, le Bluetooth est une technologie basée sur un système de radiocommunication sans fil de courte portée et à faible énergie ULP. Il est conçu pour permettre des liaisons sans fil aux appareils bon marché avec leurs périphériques informatiques et électroniques. Le Bluetooth a créé la notion de réseau local ou personnel. Il est organisé en mode maître-esclave. Il permet des connexions point-à-point ou point-à-multipoints. Ces liaisons permettent aux appareils de former un piconet (un réseau ad-hoc). Celui-ci peut contenir jusqu'à huit appareils. Le maître définit l'horloge et les créneaux temporaires pour tous les nœuds de réseau. Comme montré sur la figure II.5, deux topologies de base sont possibles en Bluetooth : Piconet et Scatternet.

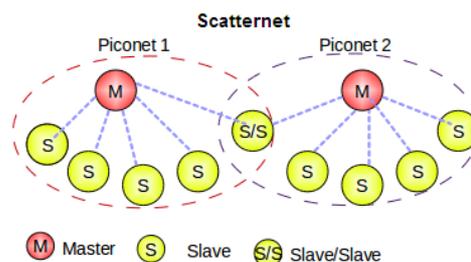


Figure II.5 Topologies Piconet et Scatternet de Bluetooth

La confidentialité des données pour cette technologie est un point noir surtout si l'appareil n'est pas correctement configuré. En plus sa consommation énergétique est élevée avec l'application permanente d'une portée correcte [123, 146, 148-152].

### **III.2 UWB IEEE 802.15.3**

L'UWB ou l'IR-UWB est une technologie radio de transmission d'informations caractérisée par une consommation de très faible d'énergie, une courte portée et un haut débit. Une des caractéristiques la plus intéressante de l'UWB est de permettre une bande passante de plus 110Mb/s (jusqu'à 480Mb/s). Il peut satisfaire un grand nombre d'applications. Il permet aussi des liaisons sans fil. L'UWB présente de fortes contraintes de synchronisation en raison de son très faible rapport cyclique. Elle peut potentiellement fonctionner à des vitesses plus élevées que le Wi-Fi. L'UWB est destinée à la communication WPAN. La technique de multiplexage qu'elle utilise est l'OFDM. C'est pourquoi, les systèmes UWB trouvent leurs applications haut débit dans le transfert efficace des données, l'imagerie radar, la collection de données par des capteurs cibles, et dans la précision de localisation ou de suivi [146, 153].

### **III.3 ZigBee IEEE 802.15.4**

Le ZigBee est une technologie de communication sans fil. Il capable de transférer des petits paquets sur des grands réseaux. Il fonctionne avec une fréquence de 2,4GHz de 16 canaux. Ils sont disponibles à un faible débit de données environ 250kbits/s avec une consommation typique de puissance de 125mW à 400mW. Cette disponibilité permet la sélection facile d'un canal en évitant les interférences radio. Vu sa capacité d'interconnecter des unités embarquées autonomes dans des environnements radio difficiles et dans des endroits isolés, elle est destinée à des applications de RCSF à faible coût et à ultra faible consommation d'énergie. Il est très appliqué dans tout réseau WPAN ou WLAN. Comme illustré sur la figure II.6, le réseau ZigBee permet un fonctionnement sur une topologie en étoile, maillée ou arborescente. Dans ces topologies, deux types de modules sont définis au niveau de la couche MAC comme suit.

- *Module à fonction complète* FFD a toutes les fonctions possibles. Il peut accomplir trois rôles : routeur de paquets, dispositif terminal (capteur) et coordinateur du réseau PAN. Celui-ci gère l'ensemble des fonctions du réseau telles que l'initialisation, l'authentification, la sécurité, le trafic, la sélection du canal approprié et la connexion des autres périphériques ;
- *Module à fonction réduite* RFD a des fonctions limitées. Il est le dispositif terminal (capteur). Il ne peut pas devenir un coordinateur PAN ;

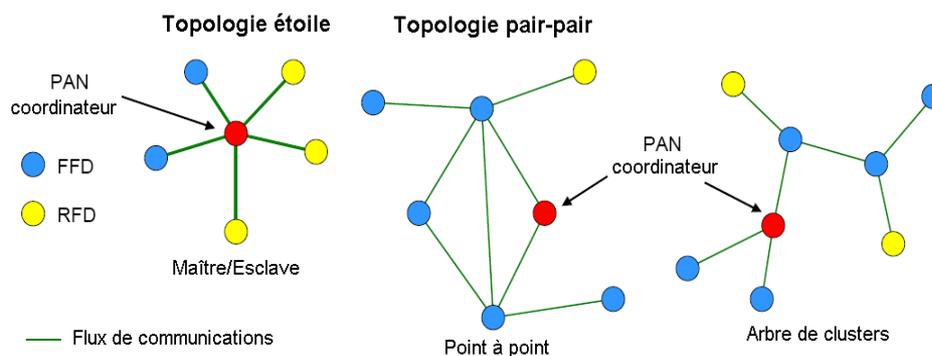


Figure II.6 Topologies de ZigBee

Tous les modules doivent utiliser le même canal pour dialoguer. En plus, un seul coordinateur doit être présent pour le même réseau [123, 146, 148, 154-156].

Dans n'importe quel réseau, les données sont transmises en trames ou en paquets. La transmission par commutation de paquets permet d'optimiser la capacité de connexion, de minimiser le temps de réponse et d'augmenter la fiabilité de la communication. La structure des trames ZigBee est robuste. La transmission par trames permet de réduire au maximum la complexité et d'adapter sa diffusion à un environnement fortement bruité. Elles ont chacune une taille maximale de 128Octets.

Cette technologie ZigBee est capable de transférer des petits paquets de données dans des grands réseaux. Elle permet d'économiser l'énergie, car plus que le paquet est petit plus que tout nœud dans le réseau est capable de se remettre en veille rapidement. Le standard 802.15.4 définit 4 types de trames usuelles. L'architecture de la trame MAC est flexible donc adaptable aux différentes applications [157].

1) *Trame de données* : elle est utilisée pour tous les transferts de données. Cette trame permet une charge utile allant jusqu'à 104 Octets. Le contenu de cette trame est détaillé sur la figure II.7.

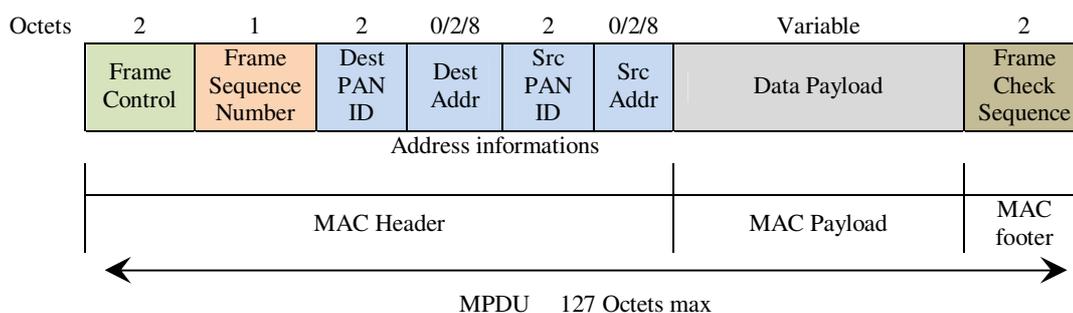


Figure II.7 Trame de données

2) *Trame de commande MAC* : elle est utilisée pour gérer les transferts de contrôle MAC, comme la notification des conflits, la demande de données, etc. Son contenu est détaillé sur la figure II.8.

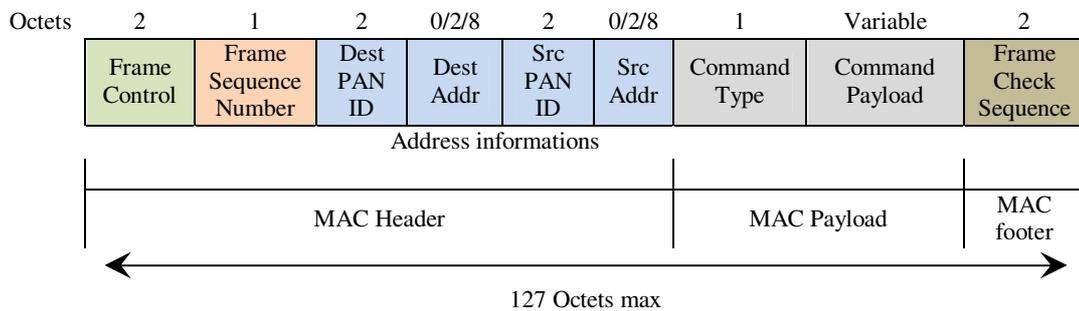


Figure II.8 Trame de commandes

3) *Trame de balise (beacon)* : elle est utilisée pour réveiller les nœuds clients. Ceux-ci étaient en train d'attendre leurs adresses. Ils se rendorment s'ils ne les reçoivent pas pour garantir une consommation d'énergie minimum. Cette trame utilise une structure de super-trame pour contrôler l'accès au canal. Son contenu est détaillé sur la figure II.9.

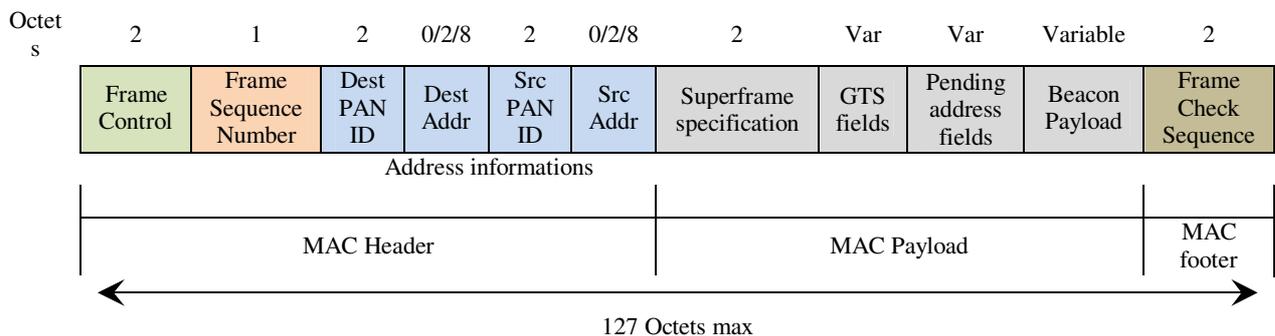


Figure II.9 Trame de balise (beacon)

4) *Trame d'acquiescement ACK* : elle est utilisée pour confirmer qu'une trame de données a été reçue avec succès et sans erreur. Elle exploite le contrôle de redondance cyclique CRC 16 bits. Son contenu est détaillé sur la figure II.10.

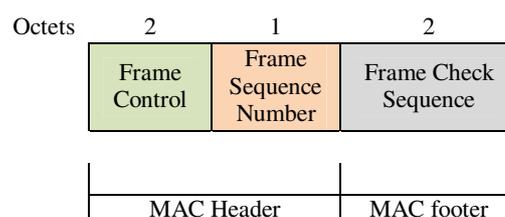


Figure II.10 Trame de d'acquiescement

La structure de la trame PHY est composée de trois parties comme illustré sur la figure II.11. Le service de données PHY permet la transmission et la réception des unités de données du protocole PHY (PPDU) à travers le canal physique radio.

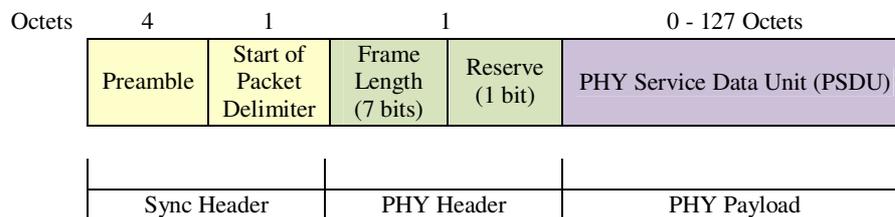


Figure II.11 Trame PPDU

Les caractéristiques de la couche PHY sont l'activation de l'émetteur-récepteur radio, la désactivation de celui-ci, la détection de niveau d'énergie, l'indication de qualité de liaison, la sélection de la fréquence de canal, la commutation de canal, etc. Les différents champs des trames MAC sont décrits dans le tableau II.5 suivant.

Tableau II.5 Champs des trames MAC

Champs	Description
Frame Control	Contient des informations définissant le type de trame, champs d'adressage, et d'autres drapeaux de contrôle
Sequence Number	Assure l'ordre à la réception et permet l'acquittement des trames MAC
Adress informations	Varie de 0 à 20 octets en fonction du type trame
Frame Check Sequence	Assure que la trame est transmise sans erreur
Pending address fields	spécifie l'attente des messages d'un nœud
GTS fields	Reserve un intervalle de temps pour les nœuds exigeant une bande passante garantie
Superframe specification	Mise en place par le coordinateur pour transmettre des trames Beacon à des intervalles réguliers autorise 16 créneaux de temps (time slot) de largeur égale entre deux Beacon pour la compétition d'accès au canal
Preamble	Assure la synchronisation
Start of Packet Delimiter	Signifie la fin de préambule
PHY Header	Spécifie la longueur de la charge utile de PSDU

### III .4 ZigBee IP IEEE 802.15.4 basé sur IPv6

ZigBee IP est la première spécification IPv6. Cette technologie est basée sur des normes ouvertes aux réseaux de capteurs sans fil. ZigBee Alliance a fait un investissement important en mixant les protocoles réseau IPv6 à IEEE 802.15.4 pour construire des réseaux maillés sans fil. La spécification ZigBee IP offre une architecture évolutive bout-en-bout en réseau IPv6. Elle est basée sur des protocoles Internet standards. Ceux-ci optimisent le maillage et le routage en créant un réseau maillé sans fil rentable et économe en énergie.

Le réseau ZigBee IP est construit avec une architecture en couches. Il est adapté à toute couche de liaison au sein d'IEEE 802.15.4 basé sur MAC/PHY. De ce mélange des technologies résulte une architecture bien adaptée à l'extension des réseaux IP. Ceux-ci permettent l'échange d'informations de manière transparente entre les appareils utilisant une IP autorisant MAC/PHY. Les distances de transmission varient, de 50m à 200m, en fonction de la puissance de sortie et des caractéristiques environnementales de l'application.

Le ZigBee IP se trouve dans un bon nombre d'applications de contrôle et de commande comme : la métrologie, l'éclairage, l'acquisition de données industrielles, la surveillance, etc. La technologie IP se caractérise par la capacité d'auto-organisation et d'auto-réparation dans tout réseau maillé. Cela est très intéressant au cas où on dispose d'une multitude de modules. Ils servent d'émetteurs ou seulement de routeurs pour augmenter la portée de la zone couverte [145, 148, 150, 151].

### **III .5 Wi-Fi IEEE 802.11a/b/g**

Le protocole Wi-Fi est un bon élargissement du réseau WPAN. Avec le même procédé, on a construit le réseau WLAN. Il est basé sur les normes IEEE 802.11 (a/b/g/n/y), il fonctionne dans la gamme de fréquence de 2,45GHz. Son débit peut atteindre 54Mb/s pour le 802.11g et 150Mb/s pour la norme 802.11n. Il permet aux utilisateurs de surfer sur Internet à haut débit lorsqu'ils sont connectés à un point d'accès AP ou en mode ad-hoc.

Cette technologie exploite les techniques d'étalement de spectre et l'OFDM. Elles permettent d'atteindre des débits élevés et de mieux résister au bruit. La norme 802.11 a les couches du modèle OSI ci-dessous, pour une liaison sans fil :

- La couche physique PHY, qui définit la modulation et le codage de l'information ;
- La couche liaison de données, qui définit l'interface entre le bus de la machine et la couche PHY, suivant des règles de communication entre les différentes stations. Elle est constituée de deux sous-couches :
  - Le contrôle de la liaison logique LLC ;
  - Le contrôle d'accès au support MAC ;

Selon l'application souhaitée, une connexion Wi-Fi peut être mise en œuvre dans deux topologies de réseau, en offrant la possibilité de monter un réseau maillé :

- La topologie Point-à-Point ou Point-à-Multi-points BSS. Elle nécessite au moins un point d'accès AP dédié et plusieurs clients dans tout réseau WLAN. Si une station se déplace hors de son BSS, elle ne peut plus communiquer directement avec les autres membres de la BSS ;
- La topologie ad-hoc IBSS : cette configuration permet à tout nœud de fonctionner comme un point d'accès et comme un client à la fois sans point d'accès dédié. Sa mise en œuvre nécessite un examen minutieux en fonction des exigences de consommation d'énergie du système ;

On peut élargir un réseau Wi-Fi pour créer un réseau ESS de taille et de complexité arbitraire. Il est construit avec plusieurs BSS interconnectés via un système de distribution DS exploitant leurs points d'accès AP comme illustré dans la figure II.12 suivante :

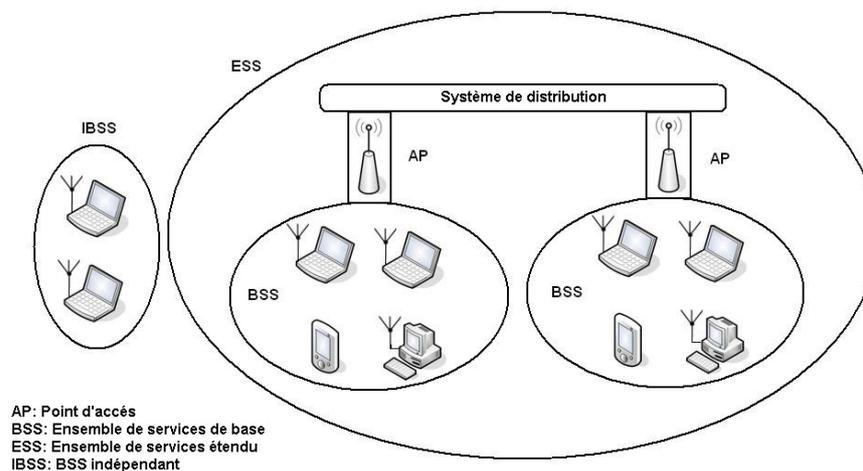


Figure II.12 Configurations IBSS et ESS du réseau Wi-Fi

Le Wi-Fi est appliqué dans de nombreux domaines tels que :

- La connexion à Internet et aux réseaux domestiques ou d'entreprises à l'aide des hotspots (les transmetteurs domestiques, les relais, la télémétrie, la télémédecine, la télé-identification, les caméras sans fil, la télévision) ;
- La téléphonie mobile Wi-Fi, exploitant la technologie VoIP ;
- Les objets intelligents communicants dans l'industrie ;
- Le couplage à des technologies de collecte, de type satellite, fibre optique, Wi-Max et GPRS, pour constituer un réseau étendu ;

La technologie Wi-Fi possède des caractéristiques de débit et de routage intéressantes, mais elle a l'inconvénient de consommer plus d'énergie par rapport aux autres technologies, car tout

capteur intelligent se trouvant en module embarqué et alimenté, devra avoir une durée de vie considérable sans avoir besoin de recharger sa batterie [122, 123, 128, 145, 146, 148, 152].

### **III .6 Wi-Max IEEE 802.16**

Il s'agit d'une technologie de télécommunications sans fil de longue portée, destinée à transmettre des données. Sa portée peut aller jusqu'à 50km pour les stations fixes et de 5 à 15km pour les appareils mobiles. Son débit peut atteindre entre 40Mbits/s et 1Gbits/s. Elle sert à connecter les points d'accès à Internet en reliant les nœuds fixes surtout éloignés. Cette technologie est trop onéreuse et exige une forte puissance. Elle est utilisée en transmission de haut débit en zone géographique étendue. C'est un protocole de transfert de large bande passante. Les réseaux Wi-Max sont une version longue portée des réseaux Wi-Fi. Ils peuvent représenter des réseaux sans fil métropolitains WMAN.

La couche MAC du Wi-Max applique un algorithme d'ordonnement. Il alloue des ressources d'accès à chaque station. Ainsi, le réseau peut contrôler les paramètres de QoS en répartissant dynamiquement l'allocation des ressources radio entre les stations. Alors que la couche PHY permet de partager la ressource radio à la fois en temps et en fréquence entre plusieurs terminaux. Elle distribue les données sur un grand nombre de porteuses compris entre 128 et 2048.

Le caractère de mobilité aisée ainsi que les coûts industriels et d'installations réduits, ont permis de multiplier les applications de Wi-Max. En effet, on trouve :

- Couvertures conventionnelles des zones commerciales : zones d'activité économique, parcs touristiques, centres hôteliers, etc. ;
- Déploiements temporaires : festivals, infrastructure de secours sur une catastrophe naturelle, etc. ;
- Gestion de réseaux de transports intelligents ;
- Zone hospitalière étendue (lieu médicalisé) ;
- Sécurité maritime et sécurité civile ;
- Systèmes d'information géographique déportés ;
- Métrologie (télémessure, pilotage à distance, relevés géophysiques,...) [145, 148, 152, 158-160].

### III .7 Technologie GSM/GPRS 850-900DCS/PCS

Le GSM est une technologie du téléphone cellulaire de faible puissance et de bonne portée. Elle a été spécifiée et mise au point pour la gamme de fréquences 900MHz. Une variante DCS utilise la gamme de fréquences 1800MHz. Deux autres variantes PCS existent, en 850MHz et en 1900MHz. La norme GSM a été étendue par les extensions GPRS, pour supporter des plus hauts débits et plus de transport des données en mode paquets (textes, sons, images). Le GPRS permet de fournir une connectivité à l'aide le protocole standard (IP, X.25). Il est constamment disponible en station mobile. Les ressources radio (entre 1 et 8 canaux) sont allouées dynamiquement quand les données sont à envoyer ou à recevoir, ce qui permet une économie de ces ressources.

Dans ce cas, aucun délai de numérotation n'est nécessaire. Avant le GPRS, l'accès à un réseau se faisait par commutation de circuits où le canal radio était réservé en continu à la connexion. Le service GPRS est présent partout où la couverture mobile existe. Il assure un débit faible (quelques dizaines de kbits/s) et un coût élevé. L'Activation du GPRS sur un réseau GSM nécessite l'ajout de deux modules de base : la passerelle (nœud de service GPRS) GGSN et le (nœud de service GPRS de desserte) SGSN. Le GGSN agit comme une passerelle entre les réseaux de données publiques (IP, X.25,...) et d'autres réseaux GPRS pour faciliter l'itinérance. Le nœud SGSN de support GPRS assure le routage des paquets vers et depuis la zone de service SGSN pour tous les utilisateurs dans cette zone de service [161-165].

Cette technologie offre les caractéristiques suivantes :

- La mobilité : est la capacité de maintenir les communications voix et données constantes lors des déplacements ;
- L'immédiateté : permet aux abonnés d'obtenir une connectivité en cas de besoin, indépendamment de leur emplacement et sans une longue session de connexion ;
- La localisation : permet aux abonnés d'obtenir des informations pertinentes à leur emplacement actuel ;

Contrairement à une communication vocale où un et un seul intervalle temporel TS lui est alloué pour la transmission de la voix, le nombre de TS peut varier, entre un minimum fixé à 2 TS et un maximum fixé à 8 TS par canal, dans une liaison GPRS. Cela est en fonction de la saturation ou de la disponibilité de la station de base BTS. Celle-ci peut émettre en couvrant une surface de rayon compris entre 2km et 35km.

$$TS_{\min} = 2 \leq TS \leq TS_{\max} = 8 \quad (\text{II.1})$$

Le débit de chaque TS est déterminé par le mode de codage CS. Il est illustré sur la figure II.13, qui caractérise la qualité de la transmission radio. L'affectation des intervalles de temps se fait d'une manière dynamique. Le débit du réseau varie selon les conditions radio. Ce débit par intervalle de temps dépend non seulement de la modulation, de la qualité du lien et du temps de propagation mais aussi du schéma de codage CS utilisé. Ce dernier agit sur la compression des données comme multiplicateur de débit. Ce débit varie alors de 9,05kbits/s (ou CS-1) à 21,4kbits/s (ou CS-4) par intervalle de temps. Le taux de codage est considéré comme le nombre de symboles envoyés dans une certaine période [145, 166].

Donc le débit théorique maximal est de  $8TS \times CS4 = 171,2 \text{kbits/s}$ , mais en pratique le débit maximal est d'environ 50kbits/s. Le débit usuel de  $2TS \times CS2 \times 2/3 = 17,9 \text{kbits/s}$ , soit environ 2koctets/s. Le taux de codage permet d'augmenter le débit lorsque les conditions de propagation sont favorables.

Dans le réseau GPRS, les canaux des liaisons montantes et descendantes sont réservés séparément. Cela permet d'avoir des stations mobiles avec différentes capacités de liaison montante et descendante. Les paquets peuvent aussi être envoyés sur le temps d'inactivité entre les appels vocaux.

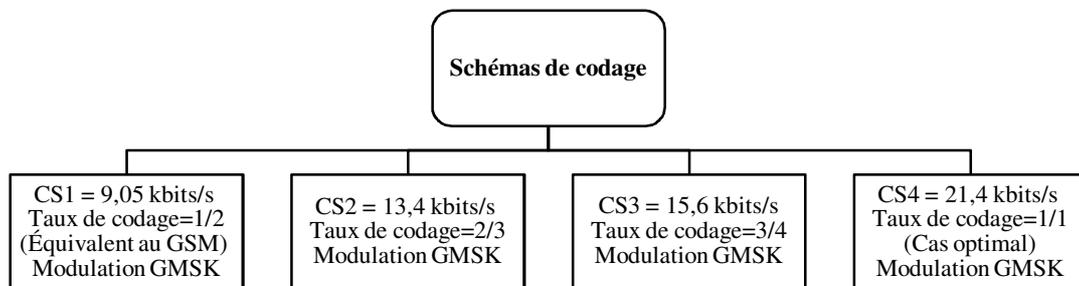


Figure II.13 Les modes de codage du réseau GPRS

Avec le système GPRS, il est possible de communiquer en architecture Point-à-Point ou Point-à-Multi-points. Alors qu'une station mobile GPRS peut fonctionner dans l'un des trois modes de fonctionnement suivants :

- Mode de fonctionnement classe A : où l'utilisation est simultanée des paquets, les connexions sont en mode circuit, l'appel vocal GSM est normal et la réception des paquets de données GPRS est en même temps ;

- Mode de fonctionnement classe B : où aucun trafic n'est simultané. Dans ce cas, la station mobile en mode veille est nécessaire pour surveiller les canaux de pagination ;
- Mode de fonctionnement classe C : où l'utilisation est alternative. Là, une station mobile peut être attachée soit au réseau GSM soit au réseau GPRS. La sélection se fait manuellement ;

Cette norme GPRS a un large éventail d'applications puisqu'elle offre des solutions de communication sur des vastes étendues. C'est-à-dire, elle se trouve opérationnelle là où les solutions à bande passante étroite et spectre diffus ne peuvent fonctionner. En effet, elle est efficace dans la surveillance, le contrôle, les télécommunications, les services d'information, le E-commerce, la localisation, la métrologie, etc. Dans certains systèmes à capteurs intelligents, le réseau GPRS peut être combiné avec le réseau ZigBee. Des capteurs déployés dans une zone de captage très étendue, utilisent les services de GPRS pour transmettre les données recueillies au centre de surveillance.

Dernièrement, le réseau EDGE est apparu comme une extension améliorée du réseau GPRS. Il introduit une nouvelle modulation, de nouveaux schémas de codage et une généralisation du principe d'adaptation de lien radio. Ce plus est pour garantir un débit satisfaisant et une augmentation de la vitesse de transmission des données [166].

#### **IV. Indicateurs de performance d'un protocole avec simulation**

La qualité de transmission dans une communication sans fil se dégrade avec les interférences et avec la faiblesse de la puissance d'émission. En effet, les défauts de certains paramètres physiques (bande passante, sensibilité aux bruits, taille du réseau, limites des débits possibles, limites de puissance requise, schéma de modulation, etc.) perturbent cette communication. Alors, leur contrôle cyclique avec correction est donc nécessaire pour assurer la qualité des signaux utiles et la performance désirée. Des indicateurs de performance d'un protocole de communication sans fil sont mis en évidence ci-après.

##### **IV.1 Taille du réseau :**

La taille du réseau GPRS dépend de niveau des interférences, de la taille des paquets du trafic des données, des protocoles de transmission mis en place et de nombre d'utilisateurs connectés à ce réseau. Ce nombre peut atteindre 1000 sessions pour une seule cellule. Le réseau ZigBee en étoile, occupe la première place avec un nombre maximum de nœuds dépassant 65000. Le réseau Wi-Fi a la deuxième place avec un nombre de nœuds atteignant 2007 et une structure BSS. Tandis que, le réseau Wi-Max présente une taille de 1600 nœuds. L'UWB, en structure piconet,

permet des connexions de 236 nœuds chacune. Dans la dernière place se trouve le Bluetooth. Celui-ci peut construire son réseau piconet avec 8 nœuds. Chacun de ces protocoles a une prévision d'extension pour toute structure de réseau plus complexe. Elle est construite à partir des cellules de base pouvant servir pour agrandir la taille du réseau.

## IV.2 Temps de transmission

Le temps de transmission dépend de débit des données, de la taille du message, et de la distance entre nœuds. Le temps de transmission en ( $\mu$ s) peut être défini comme suit [146] :

$$T_{tx} = \left( N_{data} + \left( \frac{N_{data}}{N_{maxPld}} \times N_{ovhd} \right) \right) \times T_{bit} + T_{prop} \quad (II.2)$$

Avec :

$N_{data}$  la taille de données utile

$N_{maxPld}$  la taille maximale de charge

$N_{ovhd}$  la taille de données

$T_{bit}$  le temps de transmission d'un bit

$T_{prop}$  le temps de propagation entre deux nœuds qui sera négligé

Les paramètres typiques des différents protocoles de communication sans fil, utilisés pour évaluer le temps de transmission, sont donnés dans le tableau II.6 [167, 168].

Tableau II.6 Paramètres typiques des protocoles de communication sans fil

Protocole	Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi	Wi-Max	GSM/GPRS
Débit Max. (Mbits/s)	0.72	110	0.25	54	70	0.168
Bit time ( $\mu$ s)	1.39	0.009	4	0.0185	0.0143	5.95
Max data payload (octets)	339 (DH5)	2044	102	2312	2700	1500*
Max overhead (octets)	158/8	42	31	58	40	52*
Coding efficiency <sup>+</sup> (%)	94.41	97.94	76.52	97.18	98.54	80.86

\* Où la taille de données est 10 KOctets      \* Pour le Protocole TCP/IP

D'après la figure II.14, on remarque que le temps de transmission pour le GSM/GPRS est le plus long par rapport aux autres protocoles. Cela est en raison de son faible débit des données (168Kbits/s). L'UWB nécessite moins de temps de transmission en comparaison avec les autres technologies, car son débit est important. On observe aussi que le temps de transmission requis est proportionnel à la taille de la charge utile des données  $N_{data}$ . Ce temps n'est pas proportionnel au débit maximum des données.

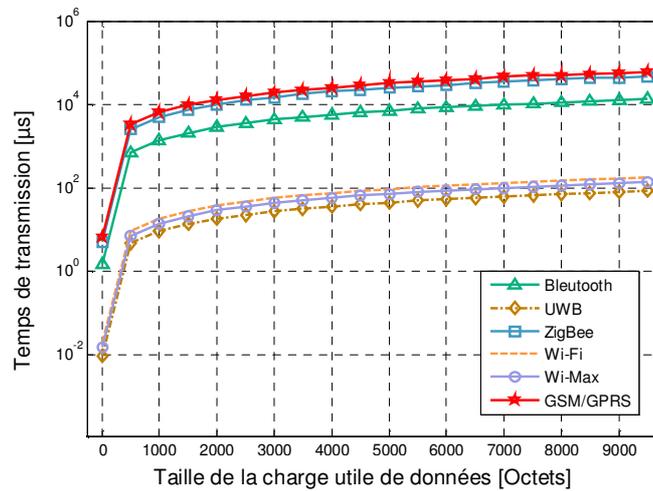


Figure II.14 Temps de transmission selon la taille de données

### IV.3 Puissance de transmission et portée

Dans les transmissions sans fil, la relation entre la puissance reçue et la puissance émise est donnée par l'équation de Friis [122, 167-171] :

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t G_r \left( \frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \quad (\text{II.3})$$

Avec

$P_t$  : puissance émise

$P_r$  : puissance reçue

$G_t$  : gain d'antenne d'émission omni basique

$G_r$  : gain d'antenne de réception

$D$  : distance (portée) séparant les deux antennes

$\lambda$  : longueur d'onde du signal

D'après l'équation (II.3), on obtient une couverture de portée:

$$D = \frac{1}{\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{P_r}{P_t G_t G_r}}} \quad (\text{II.4})$$

On remarque que lorsque la fréquence augmente, cette portée diminue. La figure II.15 ci-dessous montre la variation de la portée du signal en fonction de la fréquence de transmission à puissances fixes. La caractéristique la plus révélatrice de ce graphique est la non-linéarité. Les

signaux GSM/GPRS à 900MHz se propagent beaucoup mieux que ceux ZigBee, Wi-Fi, ou Bluetooth à 2,4GHz et beaucoup plus que ceux UWB à 3,1GHz en zone de couverture.

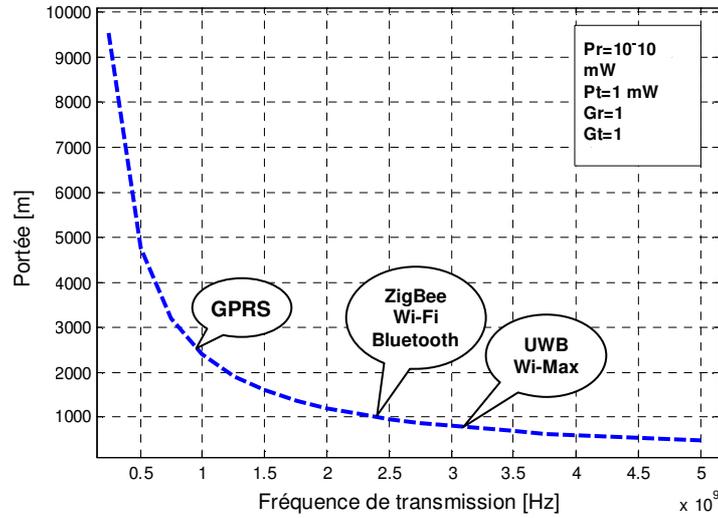


Figure II.15 Portée du signal en fonction de la fréquence de transmission

#### IV.4 Consommation d'énergie

Le rôle principal d'un capteur intelligent dans une zone de captage est de détecter des événements, calculer et agréger les données collectées, puis les transmettre à la station de base. La consommation d'énergie est concernée en trois opérations : acquisition, communication calcul et agrégation des données. La consommation de l'énergie par l'opération d'acquisition dépend de la nature d'application choisie [124]. La transmission des données consomme plus d'énergie que les autres opérations. Elle dépend de la distance séparant l'émetteur du récepteur [125, 126].

L'énergie consommée par un capteur intelligent dans la transmission d'un message de  $k$  bits est fonction de la portée de communication  $d$ . La valeur de cette énergie est, d'après le modèle énergétique radio le plus largement utilisé, comme suit [127, 172-175] :

$$E_{TX}(k, d) = \begin{cases} k \cdot \epsilon_{fs} \cdot d^2 + k \cdot E_{Elec} & d < d_0 \\ k \cdot \epsilon_{amp} \cdot d^4 + k \cdot E_{Elec} & d \geq d_0 \end{cases} \quad (II.5)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{amp}}} \quad (II.6)$$

$E_{Elec}$  : énergie électronique

$\epsilon_{fs}$ ,  $\epsilon_{amp}$  : énergie d'amplification

L'énergie électronique  $E_{Elec}$  dépend de plusieurs facteurs tels que le codage numérique, la modulation, le filtrage, et la propagation du signal. Tandis que l'énergie d'amplificateur dépend de la distance d'émetteur au récepteur, de la sensibilité requise par le récepteur et de taux d'erreur binaire acceptable. Dans ce modèle, l'émetteur dissipe l'énergie pour faire fonctionner l'électronique radio et l'amplificateur de puissance. Le récepteur dissipe de l'énergie pour faire fonctionner aussi l'électronique radio. Il est observable que l'atténuation de puissance est fonction de la distance entre l'émetteur et le récepteur.

Si la portée de communication est fixe, plus que la taille des messages est élevée plus que l'énergie nécessaire pour diffuser cette information le long de cette distance est élevée. De même, une augmentation de distance entre l'émetteur et le récepteur conduit à une augmentation de l'énergie requise pour la transmission. Ainsi, il est recommandé que la taille des paquets doit être choisie avec précision. En effet, si elle diminue, le nombre de paquets de contrôle générés, augmente l'overhead.

La figure II.16 illustre l'évolution de la consommation de l'énergie pour le protocole ZigBee en fonction de la portée du signal. Une augmentation de la taille des paquets permet alors une augmentation de l'énergie de transmission. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau II.7 suivant.

Tableau II.7 Paramètres de simulation de l'énergie de transmission

Paramètre	Valeur
$E_{Elec}$	50 nJ/bit
$\epsilon_{fs}$	10 pJ/bit/m <sup>2</sup>
$\epsilon_{amp}$	0.0013 pJ/bit/m <sup>4</sup>

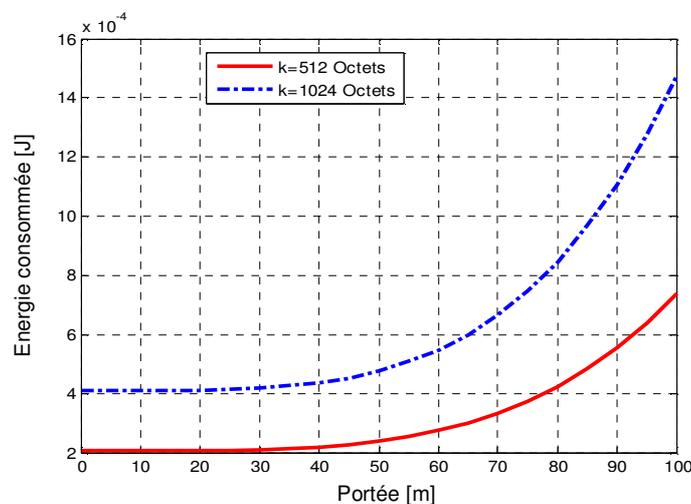


Figure II.16 Consommation de l'énergie en fonction de la portée du signal

La puissance reçue, prédite par un capteur intelligent pour chaque paquet de données, en fonction de la portée de communication  $d$ , est donnée ci-dessous. Elle est définie selon les modèles “Two-Ray Ground” et “Espace libre de Friss” [127, 170, 171].

$$P_r(d) = \begin{cases} \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L} & d < d_c \\ \frac{P_t G_t G_r h_t^2 h_r^2}{d^4} & d \geq d_c \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$d_c = \frac{4\pi \sqrt{L} h_t h_r}{\lambda} \quad (\text{II.8})$$

$L$  : Perte du trajet

$h_t$  : Hauteur de l’antenne du transmetteur

$h_r$  : Hauteur de l’antenne du récepteur

$G_t$  : Gain de l’antenne de transmission

$G_r$  : Gain de l’antenne de réception

$\lambda$  : Longueur d’onde du signal porteur

$d$  : Distance entre l’émetteur et le récepteur

La figure II.17 montre l’évolution de la puissance de réception. Elle est en fonction de la portée du signal pour les protocoles étudiés et pour tout paquet de données de taille fixe.

Tableau II.8 Paramètres de simulation de puissance reçue selon les protocoles

Paramètre	Valeur
$L$	1
$G_t = G_r$	1
$h_t = h_r$	1.5m

Protocoles	Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi	Wi-Max	GSM/GPRS
Puissance Transmise (Watt)	0.1	0.04	0.0063	1	0.25	2

On remarque d’après la figure ci-dessus que lorsque la distance entre l’émetteur et le récepteur augmente, la puissance de réception diminue. Les protocoles ZigBee, UWB et Bluetooth présentent une faible consommation de puissance tandis que Wi-Max, Wi-Fi et GPRS absorbent plus de puissance. La technologie ZigBee offre donc une meilleure solution économique en termes de consommation énergétique par rapport à toutes les technologies étudiées. Les technologies de communication sans fil utilisent chacune un support physique. C’est une puce (chipset) qui rassemble l’ensemble des circuits et des composants électroniques préprogrammés.

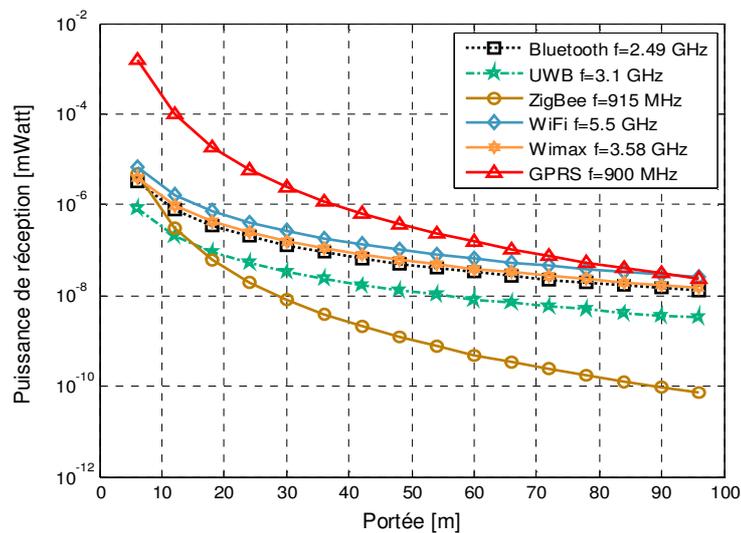


Figure II.17 Puissance reçue en fonction de la portée du signal

Ils permettent de contrôler et de gérer les actions ainsi que les flux de données numériques entre le processeur, la mémoire et les périphériques d'entrée/sortie du système relatif. Dans le but de comparer les consommations d'énergie dans les technologies indiquées, on présente dans le tableau II.9 les caractéristiques des 'chipsets' relatifs aux différents protocoles [176-181].

Tableau II.9 Caractéristiques électriques des chipsets

Protocols	Bluetooth	UWB	ZigBee	Wi-Fi	Wi-Max	GSM/GPRS
Chipset	BlueCore2	XS110	CC2430	CX53111	AT86RF535A	SIM300
V <sub>DD</sub> (volt)	1.8	3.3	3.0	3.3	3.3	3
I <sub>TX</sub> (mA)	57	~227.3	24.7	219	320	350*
I <sub>RX</sub> (mA)	47	~227.3	27	215	200	230*
Débit (Mbits/s)	0.72	114	0.25	54	70	0.164*

\* For GSM 900 DATA mode, GPRS ( 1 Rx,1 Tx )

La figure II.18 illustre une comparaison des consommations de puissance en (mW) pour les protocoles indiqués.

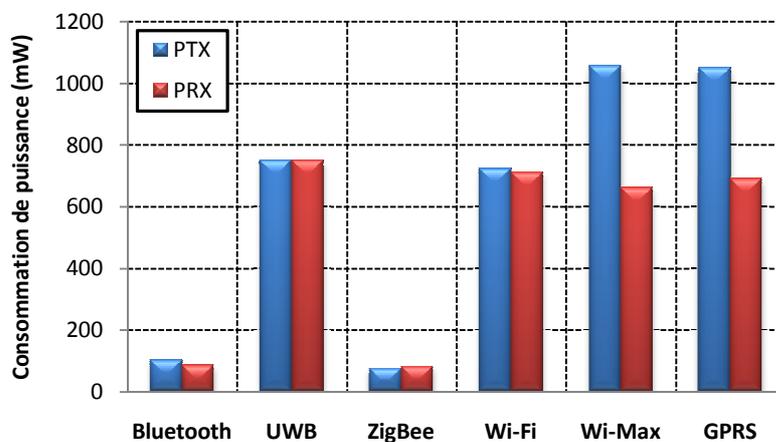


Figure II.18 Consommation de puissance pour chaque protocole

On remarque avec toute évidence, que Bluetooth et ZigBee consomment moins de puissance par rapport à UWB, Wi-Fi, Wi-Max et à une connexion GPRS. En plus, la différence observée entre la puissance de transmission et celle de réception pour les protocoles Wi-Max et GPRS est justifiée par l'atténuation du signal. Celle-ci est due au trajet de la communication, puisque ces deux protocoles couvrent chacun une zone très vaste.

En se basant sur le débit de chaque protocole, la consommation d'énergie normalisée en (mJ/Mbits) est représentée sur la figure II.19. On observe clairement que l'UWB, le Wi-Fi et le Wi-Max ont une meilleure efficacité dans la consommation d'énergie. On remarque aussi que le Bluetooth et le ZigBee sont adaptés aux applications à faible débit de données avec une consommation de puissance par batterie limitée (comme les dispositifs mobiles et les réseaux de capteurs). Leur faible consommation d'énergie leur permet une longue durée de vie. Par contre, l'UWB, le Wi-Fi et le Wi-Max seraient les meilleures pour les implémentations de grand débit de données (comme les systèmes de télésurveillance, les contenus multimédia), car leur consommation d'énergie normalisée est faible. Alors que le GPRS en vaste zone géographiques, est la solution la plus adéquate aux applications de poursuite et de localisation à faible débit de données.

$$E_{Norm} = \frac{P_t}{Débit} \quad (II.9)$$

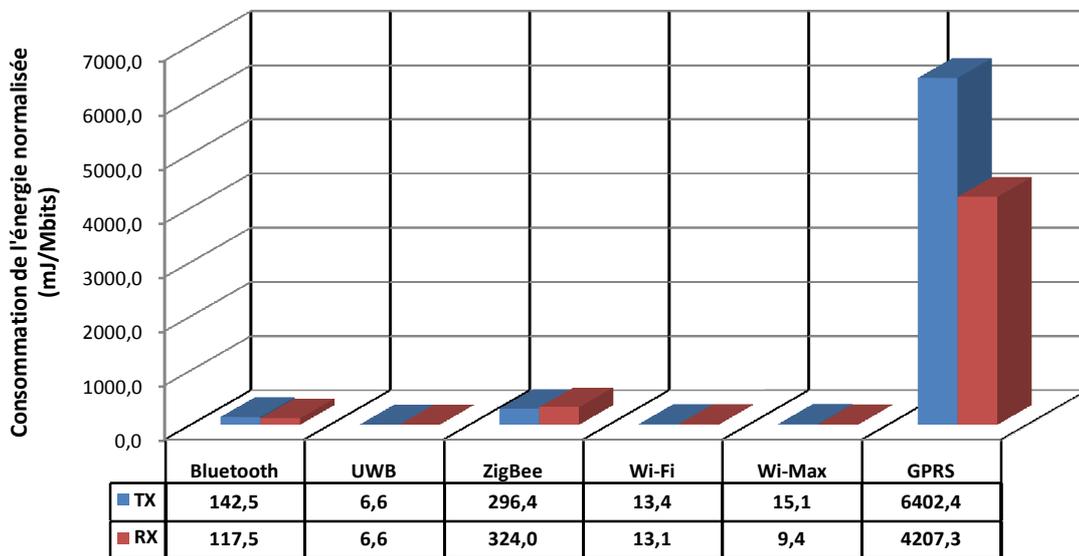


Figure II.19 Consommation d'énergie normalisée par protocole

Un autre paramètre, permettant la mesure du coût de l'énergie d'émission d'un nœud du réseau de capteurs et de déterminer par la suite la durée de vie du réseau, est l'indice de l'énergie  $E_i$ . Il est calculé comme suit [182, 183] :

$$E_i = \frac{(L-O)(1-b_e)^L}{(e_t + e_m + e_c)} \quad (\text{II.10})$$

$b_e$  taux d'erreur binaire

$O$  overhead du paquet

$e_t$  énergie d'émetteur-récepteur

$e_m$  énergie de collision, repos et d'écoute

$e_c$  énergie de calcul

La figure II.20 présente l'évolution de  $E_i$  en fonction de la taille du paquet avec :

$O=2$  octets       $e_m = 200$  nJ

$e_t = 100L$  nJ       $e_c = 100$  nJ

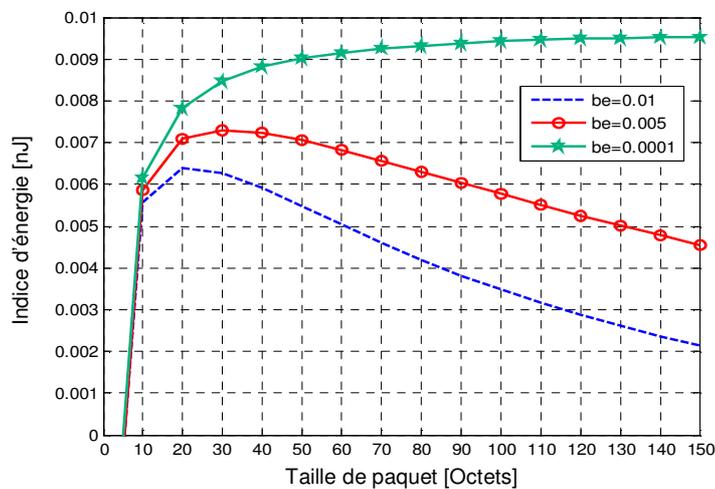


Figure II.20 Indice de l'énergie par rapport à la longueur du paquet

On peut donc observer qu'il y a une valeur optimale de la longueur  $L$  du paquet qui maximise  $E_i$ . La valeur optimale de  $L$  augmente avec un taux d'erreur binaire plus faible et/ou avec une augmentation de l'overhead du paquet  $O$ . Donc lors de la conception et le déploiement d'un RCSF, il est possible de choisir les valeurs appropriées des paramètres étudiés qui prolongeront la durée de vie du système.

#### IV.5 Débit en temps réel

Le débit en temps réel est défini pour connaître le nombre d'octets transmis par seconde sur un lien spécifique. Ce lien est applicable au trafic de données en temps réel. L'expression analytique de ce débit, relative au lien entre les nœuds est donnée par :

$$Th = \frac{m}{T_{frame} + T_{backoff}} \quad (\text{II.11})$$

$m$  la quantité de données à transmettre

$T_{\text{frame}}$  temps requis pour transmettre une trame MAC de données

$T_{\text{backoff}}$  temps moyen de retransmissions

Dans un RCSF, un mécanisme d'accès au canal appelé CSMA/CA est utilisé par les nœuds du réseau pour détecter ce canal et de vérifier s'il est occupé ou bien en veille ou non. Cela est fait avant la transmission des trames de données. Cette technique permet d'éviter les collisions, la perte de paquets et la congestion du réseau. Un nœud qui retransmet inutilement les paquets de données pour des longues périodes de temps, peut entraver le débit, causer des retards et provoquer une plus grande consommation d'énergie.

Pour surmonter ce problème, l'algorithme "backoff" détermine combien de temps devrait être passé à attendre avant la transmission lorsque le canal est occupé ou après collision. C'est-à-dire, on tient à espacer les retransmissions répétées du même bloc de données par une quantité de temps dérivée du temps TS et du nombre de tentatives de retransmission [182-185].

La figure II.21 met en évidence la variation de débit en fonction du temps de retransmissions  $T_{\text{backoff}}$ . La simulation a été réalisée pour deux valeurs de données transmises  $m_1=512\text{Octets}$  et  $m_2=1024\text{Octets}$ . En effet, elle est effectuée avec une bande passante d'un nœud du RCSF fixe de 38,4Kbits/s et avec un temps  $T_{\text{frame}}=11,39\text{ms}$ . Il semble que le débit en temps réel nécessaire pour acheminer les données, diminue avec la diminution de la taille des données transmises.

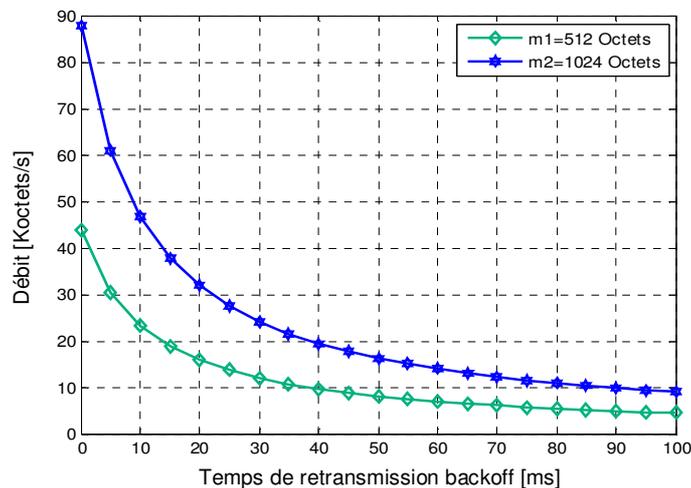


Figure II.21 Evolution de débit en fonction du temps 'backoff'

On remarque que le débit décroît brusquement pour les faibles valeurs de  $T_{\text{backoff}}$ . Ensuite, il diminue asymptotiquement pour les valeurs croissantes de  $T_{\text{backoff}}$ . Cette chute qui se produit dans le débit est due à la perte de la bande passante provoquée principalement par les collisions et les

délais de retransmissions. Il est ainsi chaque fois que deux ou plusieurs nœuds essaient de transmettre des mesures simultanément. Cela produit un phénomène de saturation.

#### IV.6 Taux d'erreur binaire B.E.R

Pour étudier le B.E.R, on a supposé que le signal transmis est corrompu par un bruit blanc AWGN. Puis, on a calculé la probabilité d'erreur binaire pour mesurer les performances des transmissions numériques sans fil utilisant les modulations B-OQ-Q-PSK, 4PAM, 16QAM, GMSK, GFSK, 8DPSK, 8PSK et OFDM. Le choix d'un schéma de modulation d'une communication sans fil utilisé dans une application donnée, dépend d'un certain nombre de facteurs. Le but d'une technique de modulation n'est pas seulement permettre de transporter un paquet de données sur un canal radio, mais aussi atteindre cet objectif avec une meilleure qualité, une bonne efficacité énergétique et avec une bande passante plus petite que possible. Ce choix de modulation a été donc basé sur les meilleures performances et sur la nature de l'application choisie. Le taux d'erreur binaire est un indicateur d'évaluation d'une communication donnée. Il permet de mesurer la performance d'une modulation utilisée dans un système de communication. Il est calculé par la formule suivante :

$$\text{BER} = \frac{N_{Err}}{N_{TxBits}} \quad (\text{II.12})$$

$N_{Err}$  : le nombre d'erreurs

$N_{TxBits}$  : le nombre de bits transmis

La figure II.22 ci-dessous, montre les variations de taux d'erreur binaire (BER) dans diverses modulations utilisées en technologie de communication sans fil en fonction du rapport signal sur bruit  $E_b/N_0$ .

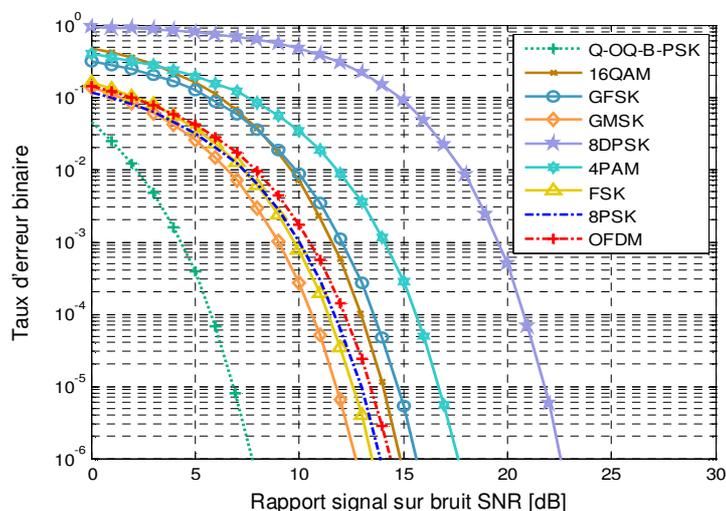


Figure II.22 Taux d'erreur binaire pour différentes modulations

Pour toutes les modulations, le BER diminue de façon monotone avec l'augmentation de rapport  $E_b/N_0$ . Ces courbes ont chacune une forme similaire à une chute d'eau [132, 133, 168-175]. L'évolution de BER pour QPSK et OQPSK, est la même que celle pour BPSK. Le taux d'erreur est plus élevé pour les modulations d'ordre (nombre d'états) supérieur.

Les modulations QPSK et GMSK semblent les meilleures, car chacune d'elles permet un compromis entre son BER et son efficacité spectrale. Ces deux modulations sont en effet, robustes. Elles sont employées par les technologies Wi-Max, ZigBee, Wi-Fi et GPRS dans des canaux et des environnements bruyants. Cependant, en raison de leur sensibilité aux bruits et aux non-linéarités, les modulations 4PAM et 8DPSK restent très rarement utilisées. La modulation QAM consomme plus d'énergie, surtout lorsque le nombre de bits par symbole augmente, mais elle permet d'obtenir une meilleure efficacité spectrale et un plus grand débit binaire. Pour les modulations à sauts de fréquence FSK, l'augmentation du nombre de bits par symbole permet la diminution du BER et l'augmentation d'occupation spectrale.

Le principal défaut de ces modulations FSK est leur faible efficacité spectrale. La modulation GMSK a été développée pour augmenter l'efficacité spectrale [170, 171]. Elle présente une performance très satisfaisante en termes du BER et de résistance au bruit. Cette modulation est appliquée dans des systèmes de transmissions des données type MODEM, dans des systèmes montés en réseau, dans le GSM, etc. Le tableau II.10 donne les valeurs de  $E_b/N_0$  qui annulent le BER pour chaque modulation [30, 170, 171, 174, 186-189]. Comme le montre le graphique II.23 ci dessus, ZigBee à été conçue pour apporter un signal très fiable et robuste dans l'environnement bruité radiofréquence.

Tableau II.10 Valeurs de  $E_b/N_0$  annulant le BER

Modulation	$E_b/N_0$ (dB)	B.E.R
B-OQ-QPSK	7,8	$10^{-6}$
GMSK	12,7	$10^{-6}$
FSK	13,3	$10^{-6}$
8PSK	13,8	$10^{-6}$
OFDM	14,3	$10^{-6}$
16QAM	14,8	$10^{-6}$
GFSK	15,7	$10^{-6}$
4PAM	17,6	$10^{-6}$
8DPSK	22,6	$10^{-6}$

En général, la probabilité d'erreur binaire la plus faible est obtenue au détriment du nombre d'utilisateurs. Une investigation sur le lien entre la qualité de transmission et le nombre d'utilisateurs servis dans un réseau sans fil [188] est à prévoir.

## IV.7 Efficacité du codage des données

L'efficacité du codage est un indicateur de performance d'un protocole de communication, car il permet de connaître le pourcentage de données volumineuses qui sont réduites en taille par le codage réalisé par les trames. Cela permet d'aboutir à une communication plus rapide par la maximisation de la capacité du canal disponible, en minimisant sa redondance. Ce paramètre peut être calculé à partir de la formule suivante [146, 190, 191] :

$$P_{cdeff} = \frac{N_{data}}{\left( N_{data} + \left( \frac{N_{data}}{N_{maxPld}} \right) \times N_{ovhd} \right)} \quad (II.13)$$

Sur la figure II.23, l'efficacité du codage augmente avec l'augmentation de la taille des données. Pour les données de petites tailles, Bluetooth et ZigBee restent les meilleurs. Tandis que pour les données de tailles importantes, les protocoles GPRS, UWB, Wi-Max et Wi-Fi sont les dominants. Ils présentent une efficacité environ 94%.

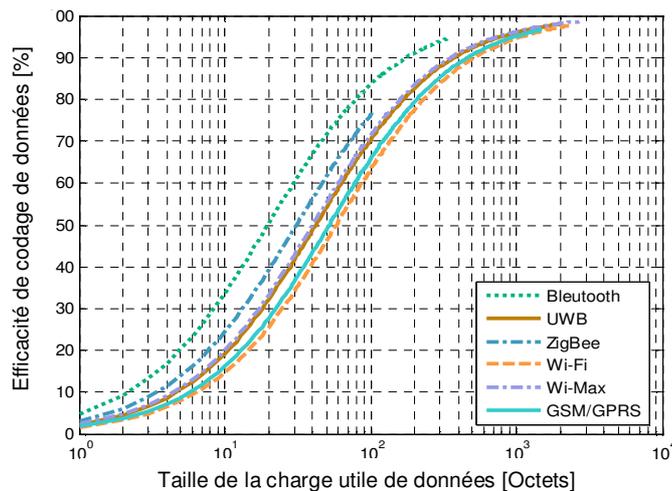


Figure II.23 Efficacité du codage en fonction de la taille des données

En application, on peut prendre comme étant un bon choix, les protocoles Bluetooth, ZigBee et GPRS surtout dans les systèmes d'automatisation à base de capteurs intelligents, car la plupart des données de télésurveillance ou de contrôle industriel sont généralement en nombre faible. En effet, dans ces lieux, les mesures de pression ou de température ne dépassent pas 40 Octets et n'exigent pas un débit important de transmission. Pour les applications exigeant une couverture plus large qu'une zone industrielle, comme la télésurveillance des frontières ou d'environnement, le GPRS et le Wi-Max sont les plus adéquats et les plus favorisés. Le Wi-Fi, l'UWB et le Wi-Max forment une meilleure solution pour les applications ayant un grand taux de transfert de données. D'autres facteurs, tels que la sensibilité du récepteur et les interférences,

favorisent énormément l'affectation des performances. On les prend en considération dans plusieurs implémentations.

#### IV.8 Efficacité énergétique de microcontrôleur

L'énergie dissipée par les calculs réalisés dans le microcontrôleur MCU d'un nœud de réseau de capteurs, est un paramètre d'évaluation très important. Elle donne une indication claire sur la quantité d'énergie consommée durant le processus de détection [93, 191]. Cette énergie formulée par l'équation (II.14) dépend essentiellement du nombre total des instructions exécutées par l'algorithme de métrologie implémenté dans l'unité de traitement de ce nœud. Elle peut être calculée comme étant la somme de l'énergie requise pour changer les états internes de MCU exprimée en (II.15) et de l'énergie de fuite qui se réfère à l'énergie perdue lorsque le MCU est au repos. Elle est modélisée par la formule (II.16).

$$E_{total} = E_{switch} + E_{leakage} \quad (II.14)$$

$$E_{switch} = C_{total} V_{dd}^2 \quad (II.15)$$

$$E_{leakage} = V_{dd} \left( I_0 e^{\frac{V_{dd}}{nV_T}} \right) \left( \frac{N}{f} \right) \quad (II.16)$$

Où  $N$  est le nombre de cycles pris par le programme pour qu'il soit exécuté.  $f$  est la fréquence d'horloge de MCU.  $V_T$  est le voltage thermique. La figure II.24 montre la comparaison entre les comportements de l'énergie consommée par instruction en fonction du nombre de cycles d'instructions effectuées par deux types de nœuds de capteurs.

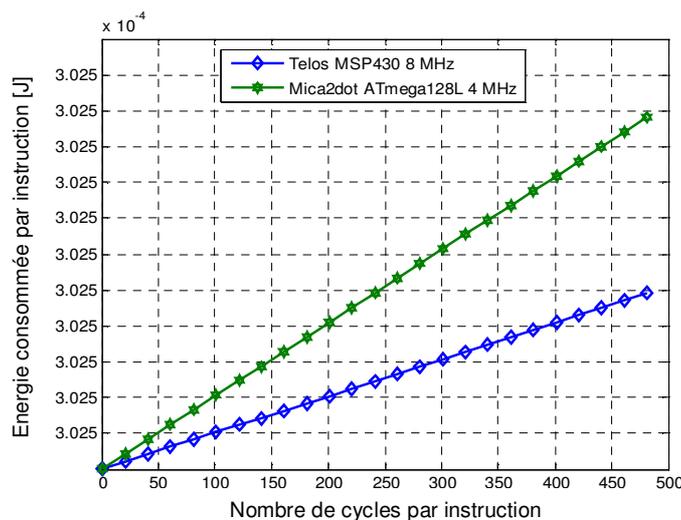


Figure II.24 Comparaison d'énergie de calcul

La consommation d'énergie augmente avec l'augmentation du nombre de cycles d'instructions. Cette consommation est très importante pour un microcontrôleur fonctionnant

avec une fréquence d'horloge faible. L'énergie de fuite de MCU est un paramètre important qui doit être optimisé lors de la conception de tout nœud de micro-capteur sans fil. Celui-ci doit consommer le minimum possible d'énergie lorsqu'il est au repos.

## V. Adaptation d'un nœud de capteur

Bien que les types de capteurs particuliers varient fortement en fonction de l'application, une panoplie de plates-formes matérielles de capteurs intelligents ont été développés. Elles sont réalisées pour faciliter le développement d'applications dans les RCSF, tels que MICA2, MICAz, TelosB [93, 182], etc. Sur la Figure II.25, est présentée une comparaison des caractéristiques des nœuds les plus populaires. Ils ont été conçus au cours de ces dernières années et ils sont disponibles sur marché. Les capacités des plates-formes indiquées varient considérablement. Chacune d'entre elles utilise un module radio ZigBee. Leurs portées radio sont différentes. Ces caractéristiques sont prises en compte par les chercheurs, par les développeurs et par les utilisateurs pour sélectionner la plate-forme la plus appropriée à leurs besoins.

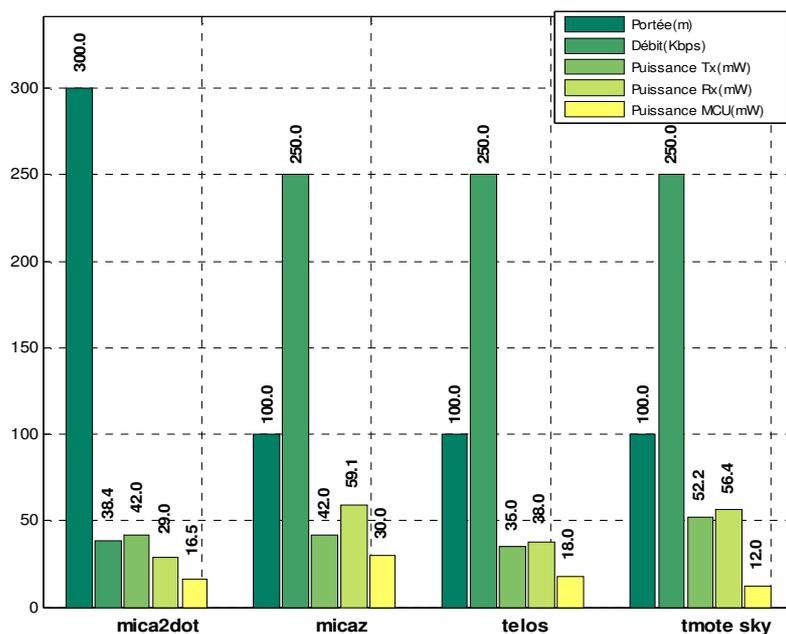


Figure II.25 Comparaison des caractéristiques des nœuds de capteurs

Parmi les applications des systèmes à base de capteurs intelligents, la production de l'énergie électrique à partir des éoliennes. Ces machines nécessitent certaine maintenance contrôlable. La concrétisation de ce concept implique la conception d'un système électronique sophistiqué. Le chapitre suivant entame d'une manière approfondie cette démarche.

# Système de Télésurveillance et de Diagnostic en Temps Réel

### I. Ennuis de télésurveillance des éoliennes

En face de la demande internationale et excessive d'énergie, la recherche de substitution de celle à base des combustibles est devenue une obligation. L'élévation des prix de l'énergie fossile, l'épuisement des ressources en exploitation et de ses réserves à long terme va entraîner une crise mondiale. Cela a supporté la recherche indiquée et signée par l'engagement de presque tous les gouvernements à réduire les émissions des gaz à effet de serre par le développement des alternatives des sources d'énergie à base des hydrocarbures.

Le recours aux énergies renouvelables devient donc un choix inévitable. Le développement de ces alternatives, est encourageant. Elles offrent des sources naturelles, économiques, propres et sûres. L'énergie éolienne en est exemple. Son application a progressé de façon remarquable ces dernières années. Elle fournit une production d'énergie électrique considérable avec moins de dépenses. Aujourd'hui, l'investissement en exploitation de l'énergie éolienne se multiplie de plus en plus. Il est justifié par la multiplication des parcs éoliens (terrestres ou offshore) et par leur expansion. Ils sont généralement installés dans des endroits éloignés, difficiles à accéder et soumis à des conditions environnementales extrêmes [99-102, 193-196].

Les éoliennes contiennent chacune un système électromécanique complexe. Il est exposé souvent à des défauts de fonctionnement. Par conséquent, leur surveillance et leur diagnostic périodique deviennent deux tâches essentielles pour assurer leur maintenance et la continuité de leur production.

Pour réduire les coûts de maintenance, minimiser les réparations coûteuses et éviter l'arrêt de fonctionnement d'installation éolienne, un pilotage automatique s'impose [99]. Même plus, une mise en œuvre d'une stratégie de maintenance à distance robuste et efficace est devenue une nécessité. Cela est toujours dans le but de garantir une alimentation sans interruption offerte par des systèmes éoliens modernes [100-103]. Cette surveillance en ligne permet une détection précoce des défauts mécaniques et électriques. Il sera capable de prévenir les principales défaillances des composants de la machine éolienne. Cela facilitera l'intervention réparatrice qui

anticipe tout arrêt définitif d'éoliennes et minimise les temps d'arrêt. Ce procédé maximise la productivité tout en analysant en permanence les signaux physiques mesurés et recueillis auprès de différents types de capteurs installés sur la machine éolienne [104-106].

Plusieurs scientifiques ont actuellement focalisé leurs travaux sur la recherche des procédures permettant l'optimisation de la fiabilité des éoliennes. En effet, la plupart des investigations récentes ont été orientées vers le contrôle électrique de ces machines, car cette technique est la plus pratique et la moins coûteuse. Elle est basée sur l'analyse du courant statorique. Il permet le diagnostic du moteur électrique à induction ou de tout générateur de courant CSA [94-121]. Il utilise le résultat de l'analyse spectrale du courant de stator pour indiquer une défaillance existante ou naissante.

En effet, avec un processeur récent du signal numérique DSP et avec une technologie de communication sans fil, il est possible de détecter en temps réel les défauts de toute machine électrique avant l'occurrence de défaillance catastrophique. Cette détection est basée sur l'examen avec précision et à faible coût, du courant statorique [38, 97].

L'objectif principal est d'étudier la conception d'un système de contrôle à distance et de suivre en temps réel son fonctionnement. Le système éolien intègre des fonctions d'intelligence et de robustesse. D'après la littérature, peu d'études ont été développées en analyse des aspects théoriques de la télésurveillance appliquée à la supervision des conditions d'exploitation des éoliennes [99-121].

Les défauts de chaque éolienne provoquent, en principe, un effet de modulation du champ magnétique dans son générateur. Il se traduit par l'apparition d'importantes harmoniques (pics) dans le spectre fréquentiel du courant statorique [99-101]. Plusieurs techniques de traitement du signal comme la Transformée de Fourier rapide FFT, la Transformée de Fourier à courte durée STFT, le Périodogramme, la Transformée en Ondelettes Discrète DWT, la représentation de Wigner-Ville, la Transformée de Concordia CT, la Transformée de Hilbert-Huang et d'autres outils avancés peuvent être appliqués dans l'examen du courant statorique. Cela est pour diagnostiquer les éventuels défauts électromécaniques d'éolienne relative, dans des situations transitoires [107-109, 193]. Par ailleurs, une approche de diagnostic [99] statistique a été proposée. Elle se base sur l'analyse des résidus des variables d'état de la machine électrique de l'éolienne. Elle est développée en appliquant la méthode de l'analyse des composantes principales PCA pour la détection de défauts dans le générateur d'une éolienne offshore. Le principal inconvénient de cette approche est lié à l'efficacité de détection. Elle nécessite un bon

choix du nombre des composantes principales. Certains chercheurs ont proposé un contrôle et un diagnostic du générateur d'éolienne par exploitation de la spectroscopie d'impédance IS [120, 121].

En raison de leurs avantages, les méthodes à haute résolution HRM comme MUSIC, ESPRIT et leurs techniques de zoom présentent notamment une haute précision d'identification des défauts. Elles peuvent détecter des fréquences suspectes à un faible SNR [43-53, 197]. Elles ont été récemment introduites dans le domaine des moteurs à induction et dans le diagnostic des défauts d'éoliennes. Elles ont amélioré la détection d'un grand nombre de fréquences caractérisant des anomalies en toute bande passante. D'autres techniques pratiques de recherche en temps réel, sont utilisées pour résoudre les problèmes de maintenance en ligne d'éoliennes. Elles sont réalisées à l'aide d'intégration des réseaux de capteurs sans fil et des protocoles de communication industriels [103-107, 113-119]. Un exemple de ces systèmes intelligents de surveillance à distance, permettant le diagnostic des défauts d'éolienne en temps réel et utilisant un module de communication sans fil, est décrit ci-dessous.

Même avec ces systèmes, la télésurveillance en ligne utilisée actuellement dans la planification de maintenance et d'entretien des parcs éoliens n'est pas optimisée. Elle comporte plusieurs limites à la fois en termes de performance et en termes de coût d'installation. Cela est le résultat de diverses raisons:

- La structure de télésurveillance à câbles, avec ses problèmes (coupures, bruits, et configuration), réalisée principalement avec des fibres optiques, n'est pas efficace et ne convient pas, car les parcs éoliens sont souvent déployés sur des grandes zones géographiques ayant divers obstacles environnementaux comme la mer, le désert, les montagnes, etc. Ils sont donc situés très loin du centre de contrôle et de supervision ;
- La télésurveillance d'éoliennes nécessite l'implémentation d'un système de diagnostic et de maintenance proactive, rapide et réactif. Il doit être basé sur une détection des défauts en temps réel et permettant une communication sécurisée avec une bonne fiabilité pour une meilleure gestion de la maintenance. Cette stratégie permet d'éviter toute défaillance menant à des graves dégâts, à des réparations coûteuses et à toute perte de production ;
- Le stockage des valeurs des paramètres surveillés dans la base de données du centre de contrôle est une nécessité. C'est une opération essentielle. Elle permet de contrôler avec précision la durée de vie des composants de l'éolienne. En effet, les données recueillies

permettent d'étudier statistiquement les défauts les plus survenants et leur temps d'occurrence ;

Pour surmonter ces contraintes d'application imposées, un système embarqué interactif a été conçu. Il assure un relais efficace, fiable et économique entre les différents capteurs de l'éolienne. Par conséquent, il assure un régime précis de contrôle et de surveillance à distance.

## **II. Paramètres surveillés dans une éolienne**

Etant donné que la machine éolienne est un système complexe. Il contient un grand nombre de paramètres à surveiller. Il y a donc, un fort besoin d'installer des capteurs qui collectent en permanence des données d'évaluation de performance de l'éolienne et de les transmettre ensuite à un contrôleur interne. Celui-ci est conçu pour effectuer un contrôle local et pour activer certaines commandes nécessaires au fonctionnement de la machine. Au cas d'anomalies ou d'erreurs, les données stockées en base de données de cette machine ou dans son journal d'alarme, permettent l'analyse et la gestion des erreurs survenues. Cette procédure permet de poursuivre, de contrôler toutes les fonctions de l'éolienne et de garantir son fonctionnement optimal à toute vitesse du vent.

Pour le traitement, les paramètres surveillés sont acquis par des convertisseurs analogique/numérique ADC. Ils sont reliés directement au système de mesure par une interface RS232, par une interface USB de l'ordinateur ou par une connexion sans fil. Quand une défaillance se produit à l'intérieur de l'éolienne, le dispositif de commande réagit immédiatement. Cela permet d'éviter l'évolution de n'importe quel type de défauts. Dans cette optique, la mise en place d'un système robuste et fiable est nécessaire. Il assure avec une haute précision la détection en temps réel des défauts dès leurs stades naissants, avant de se transformer en anomalies plus graves causant des arrêts et des dommages indésirables.

La figure III.1 contient une description détaillée de l'emplacement des différents capteurs utilisés dans la surveillance d'une machine éolienne. Les capteurs intelligents de courant et de tension sont basés sur la technique d'analyse spectrale CSA de courant statorique issu du générateur d'éolienne. Ces capteurs sont utilisés en coopération avec d'autres capteurs de vibration. Ils permettent la découverte anticipative d'éventuels défauts mécaniques incidents.

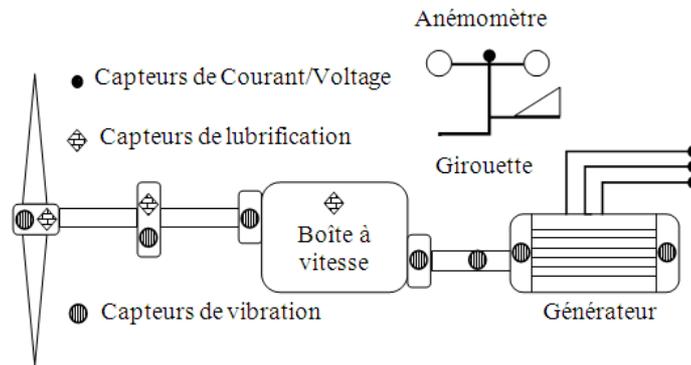


Figure III.1 Topologie de montage des capteurs

Sur le tableau III.1 est présentée une liste des capteurs et des paramètres à surveiller dans l'éolienne. L'ensemble de ces capteurs peut être vu en détails sur l'annexe III.

Tableau III.1 Paramètres à surveiller de l'éolienne et capteurs correspondants

Paramètres	Capteurs
Lubrification des roulements, boîte à vitesse	SKF Windlub
Girouette	INV-40A
Anémomètre	INA-46A
Température des roulements	PT100
Température de générateur	PT100
Température de l'air externe	PT100
Température de nacelle	PT100
Température d'huile d'engrenages	PT100
Vitesse de rotor (gear tooth)	EI 30 10 PPos, PNP
Vitesse de générateur	DU 10, EP, PNP
Position d'inclinaison (linear actuator)	Vert-X 22
Pression atmosphérique	NRG #BP20, WXT520
Humidité	P14 SMD
Vibration	WLNJ-S2-G, HS-100
Niveau d'huile hydraulique	Gems LS600-150-NO-10

### III. Structure du système et de son réseau

Le système intelligent proposé est celui embarqué, spécialisé dans le contrôle et la télésurveillance à distance. Il est intitulé IESRCM. Il a la capacité de traitement, de suivi et de supervision interactive [202-206]. Ce système trouve son application non seulement dans la surveillance à distance de l'état électromécanique des éoliennes d'un parc mais également dans de nombreux domaines tels que l'agriculture et le domaine médical [93].

L'idée génératrice de ce système repose sur la création d'un serveur Web miniaturé qui utilise seulement 256Octets de mémoire morte ROM pour sa pile TCP. Ce serveur plus petit et moins cher, exploite les ressources minimales d'un microcontrôleur : ses mémoires ROM et RAM. Il

peut surveiller et contrôler en temps réel les périphériques d'E/S branchés sur les lignes du système éolien [201-206].

En effet, il est constitué des capteurs, d'un microcontrôleur, des mémoires additives, etc. Il a généralement une fonction spécialisée à l'aide des programmes stockés sur sa mémoire ROM. Une caractéristique de ce système embarqué est sa capacité de communiquer. Cette communication peut être réalisée via Wi-Fi, GPRS, Wi-Max ou des câbles Ethernet. Le protocole TCP/IP est un standard largement utilisé ici pour la communication numérique moderne. Il fournit au système développé IESCRM un trafic de données plus rapide et en temps réel. L'objectif principal de ce module de communication est de rendre l'Internet/IP activé pour le dispositif embarqué proposé IESCRM. Il sert comme un enregistreur avancé de données à distance. Il peut être accessible à distance via Internet par un poste de travail et à n'importe quel moment. Le dispositif indiqué est interfacé avec différents capteurs illustrés dans le tableau III.1. Les mesures et les données de contrôle sont communiquées au serveur central, adoptant les technologies client/serveur et Web/base de données, par l'intermédiaire d'une connexion Ethernet ou d'une connexion sans fil. Ce serveur conserve toutes les données de passé, transmises par le système à l'aide des pages Web. La figure III.2 illustre l'architecture de ce système de contrôle IESCRM permettant le transfert de données en ligne entre les éoliennes et le centre de supervision.

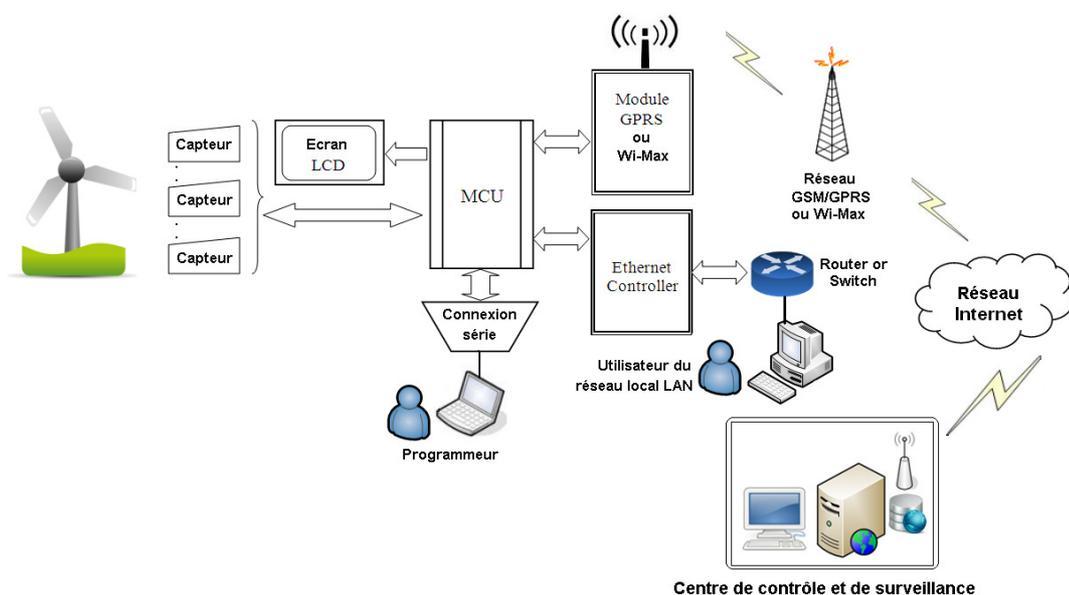


Figure III.2 Schéma bloc de l'architecture du système de télésurveillance et de contrôle

Le choix des protocoles GPRS et Wi-Max est justifiée par plusieurs raisons. D'abord, les parcs éoliens sont installés sur des vastes zones géographiques. Elles peuvent atteindre quelques kilomètres carrés. Par suite, leur surveillance à distance nécessite un protocole de

communication sans fil à large portée de couverture. Dans ce contexte, la mise en œuvre des technologies sans fil choisies ne nécessite aucune installation de nouvelles infrastructures supplémentaires, car elles utilisent le réseau cellulaire de téléphonie mobile 2.5G, 3G ou 4G. Certaines différences existent entre les deux protocoles choisis sont le taux de données transmises et le temps de transmission [129-131].

Les capteurs mentionnés dans le tableau III.1, sont reliés aux entrées du microcontrôleur MCU. Il est considéré comme un mini ordinateur du système IESCRM. Les sorties du MCU sont connectées à la puce Ethernet ENC28J60 [200, 201]. Celle-ci est liée au réseau local LAN avec un câble Ethernet via le port RJ45. La figure III.3 montre, en effet, l'interconnexion du circuit ENC28J60 avec le MCU. L'alimentation électrique du module IESCRM ne pose aucun problème, car ce module peut être alimenté par une batterie rechargeable connectée à un convertisseur AC/DC dépendant de l'éolienne en fonctionnement.

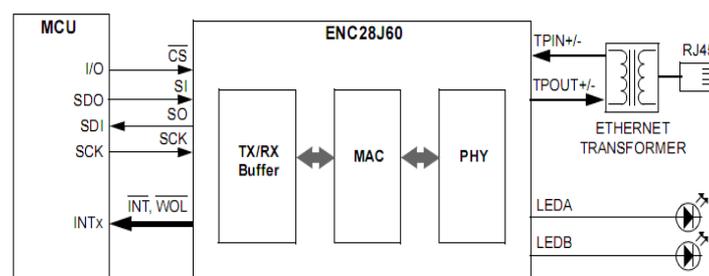


Figure III.3 Interconnexion entre le circuit d'Ethernet et le MCU

Les modules Wi-Max et GPRS, comme le modem ZTE IX256-RJ45 [198] pour se connecter au réseau Wi-Max ou le modem SIM900A-RS232 [199] pour se connecter au réseau GPRS, sont utilisés pour établir une connexion sans fil avec le serveur de la station de supervision via le réseau Internet. Les différents capteurs sont connectés aux entrées AN<sub>0-7</sub>. Le MCU est choisi parmi la famille des microcontrôleurs PIC24, car il a plusieurs avantages comme le grand nombre de ses broches d'E/S et sa capacité mémoire plus large (voir Annexe V). En plus, il est conçu avec des canaux analogiques numériques ADC. Ceux-ci le rendent facile à interfacer avec des capteurs. Il est développé en utilisant la technologie NanoWatt réduisant la consommation d'énergie pendant le fonctionnement. Son écran LCD affiche le courant et toute nouvelle adresse IP de la communication. La connexion série RS232 est utilisée pour sa configuration (changer par exemple son adresse IP). Elle peut également être utilisée pour des fins de débogage et de programmation.

Le module IESCRM peut être considéré comme un automate avec son serveur web intégré. Une fois programmé, son logiciel comprenant des pages Web offre la configuration, le contrôle

et la visualisation du flux de données des mesures des différents capteurs reliés à ce dispositif. Le GPRS et le Wi-Max sont deux protocoles basés sur des services IP. Ils peuvent être utilisés pour accéder à plusieurs utilités comme la FTP, la navigation Web et le Simple Mail Transfer E-mail SMTP en exécutant la pile protocolaire TCP/IP. Cette pile est divisée en plusieurs couches. Le code de mise en œuvre de chaque couche réside dans un fichier source. Les services et les interfaces de programmation d'application API sont définis par des fichiers d'entête/inclusion. Un autre protocole utilisé dans le module IESCRM est le HTTP. Il permet un échange de messages textes suivi d'un transfert de données sur le Web à l'aide de la connexion TCP. En effet, pour récupérer une page Web, le navigateur ouvre une connexion TCP sur le port 80 du serveur. Puis, celui-ci utilise le protocole HTTP pour envoyer une requête.

Le programme de base, localisé dans l'EPROM du MCU, fonctionne comme un serveur fournissant un accès multi-utilisateurs à des bases de données. Un serveur Web/Base de données MySQL/PHP, basé sur des API, est utilisé pour implémenter des logiciels adéquats. Cette tâche est réalisée à l'aide du protocole CGI permettant l'interfaçage des logiciels d'application avec un serveur d'information Web. Avec cette technique, les informations concernant les paramètres physiques sont détectées par des capteurs. Ces informations sont reçues par le microcontrôleur et stockées dans des variables CGI. Ces variables peuvent être consultées simplement par les scripts CGI fonctionnant dans le serveur Web/Base de données. Les données sont, en effet, stockées dans la base de données. Leur représentation graphique peut être affichée de manière interactive dans le site Web, dynamique comme illustré sur la figure III.4.

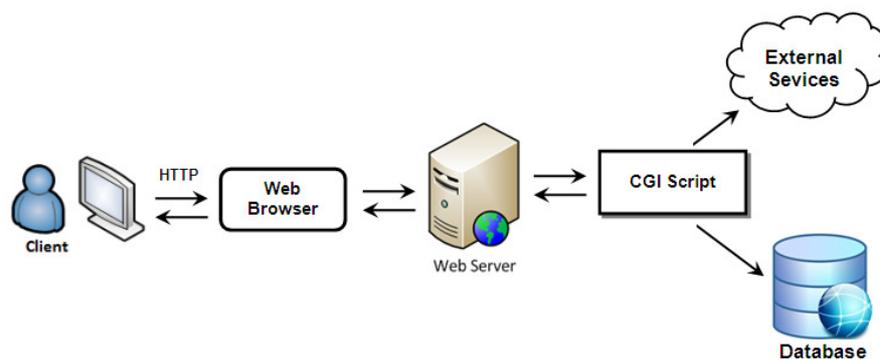


Figure III. 4 Connexion entre CGI et le serveur Web avec la base de données

Le module développé offre plusieurs fonctionnalités nécessitant une carte SIM :

- L'accès aux pages Web du module via une connexion Ethernet, GPRS ou Wi-Max
- Envoi de messages d'alarme par E-mail via GPRS ou Wi-Max
- Envoi de messages d'alarme par SMS au staff de maintenance

Le module IESCRM fournit une procédure de détection précoce des dommages. Il permet la maintenance automatique à distance et le contrôle de toute éolienne d'accès difficile. Il permet aussi de se débarrasser des tâches répétitives, effectuées par un ingénieur de service sur le terrain. En effet, réagissant aux problèmes détectés à distance, tout surveillant d'état d'éolienne peut définir les paramètres appropriés et programmer l'intervention adéquate. A toute défaillance détectée comme des pompes de lubrification vides, des lignes d'alimentation coupées ou des niveaux d'huile/graisse abaissés, les opérateurs sont avertis immédiatement. En fonction du type de défaut et de sa gravité, ces opérateurs choisissent l'un des modes de fonctionnement de l'éolienne :

- On
- Pause
- Off
- Urgence

#### IV. Conception du circuit de système

Avant la conception de système indiqué, une évaluation de son fonctionnement est réalisée par simulation informatique. Elle a été réalisée avec le logiciel Proteus ISIS 7.7 [209]. La figure III.5 montre le schéma du circuit électronique de dispositif IESCRM avec un module GPRS.

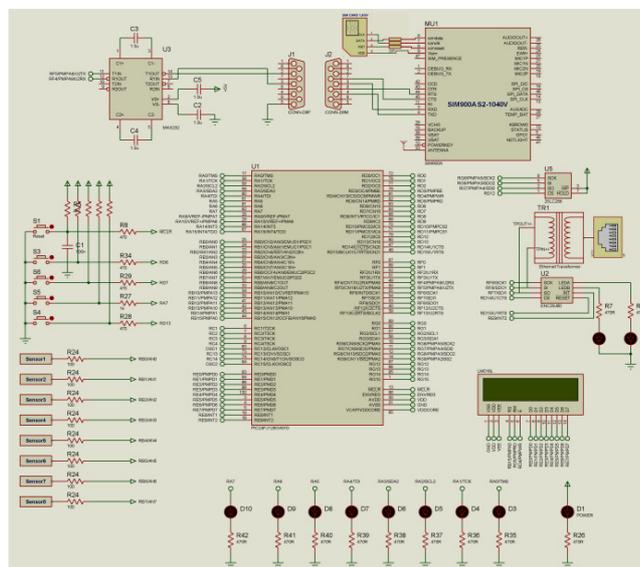


Figure III.5 Schéma électronique du système IESCRM avec GPRS

De même sur la figure III.6, est présenté le schéma du circuit électronique de l'IESCRM utilisant un modem Wi-Max. Ces circuits électroniques peuvent être consultés avec clarté sur l'annexe IV. Alors que l'architecture du réseau centralisé de la supervision et de la surveillance à distance d'un parc éolien est décrite sur la figure III.7.

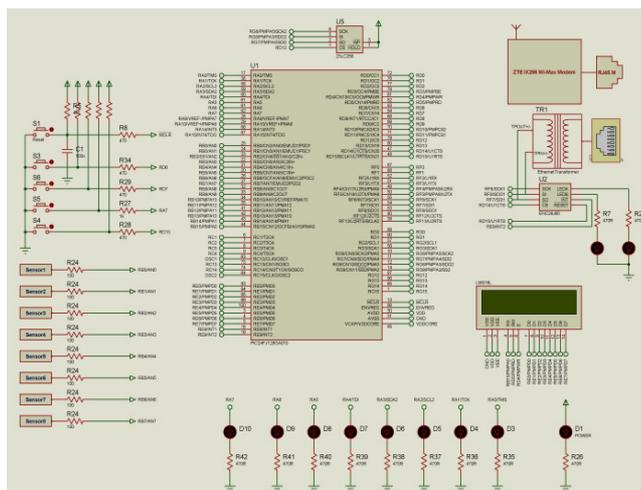


Figure III.6 Schéma électronique du système IESCRM avec Wi-Max

Les pages Web contenant les informations météorologiques peuvent être consultées à l'aide de réseau Internet. En effet, de l'appareil utilisant l'adresse IP spécifique au système à partir de la station de base ou de n'importe quel autre ordinateur connecté sur le réseau Internet, on navigue pour afficher toute information sur l'application.

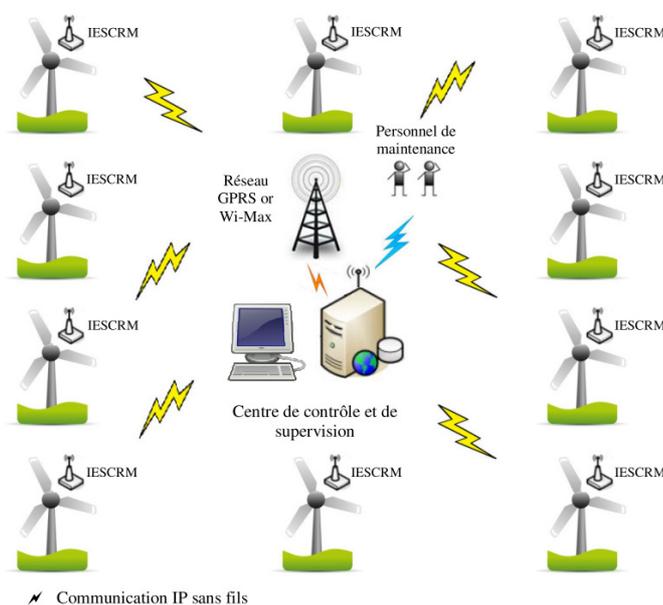


Figure III.7 Structure du système de télésurveillance et de contrôle d'un parc éolien

Pour maximiser l'espace mémoire de programme et d'être capable d'adapter son code dans un PIC24FJ128GA010 (voir Annexe V), une mémoire EEPROM 25LC256 série de type externe est ajoutée. Elle utilise l'interface SPI et est partagée avec le circuit ENC28J60. Ce dispositif est plus rapide que le bus de données I2C. Le modèle d'interface physique du système IESCRM échange des paquets de données avec la station de base à travers la connexion de GPRS ou de

Wi-Max. Le PIC24 comprend un serveur web simple [210, 211]. Il gère sa propre pile TCP/IP et son logiciel. Ce logiciel permet au microcontrôleur MCU de se comporter, en effet, comme un serveur de communication [201]. Il fournit un support d'un Web client/serveur.

Au démarrage de la simulation, l'écran de ce système affiche à l'aide de protocole DHCP l'adresse IP attribuée au modem de communication sans fil. Pour des fins de démonstration, les adresses IP des systèmes IESCRM dans le réseau de parc éolien, sont analogues chacune à 192.168.11.X. Le paramètre X est de valeur comprise entre 2 et 255. L'adresse IP du serveur central Web/base de données est assignée à 192.168.1.1. Ces systèmes sont tous connectés au même routeur de réseau.

Dans cette architecture, chaque éolienne est équipée d'un module IESCRM. Il est identifié par sa propre adresse IP. Cela permet de collecter et de stocker les données reçues des différents capteurs installés sur chaque éolienne, car le système IESCRM assure la transmission régulière, périodique et en temps réel de toutes les mesures demandées via le GPRS ou le Wi-Max vers le serveur de la station de supervision et de contrôle. Celle-ci dispose d'une adresse IP spécifique. Toute communication avec toute éolienne est établie au moyen d'une page Web dynamique illustrée sur la figure III.8.

Wind turbine ID	IP Address	Sensors	Actions	Status	Measurement	Time and Date	Save to database ?	Write to LCD!
1	192.168.11.2	Anemometer	On/Off	●	15 m/s	14.05.11 - 15.04.2014	Yes No	
		Temperature gear bearing	On/Off	●	40 °C	14.05.11 - 15.04.2014	Yes No	
		Temperature gear oil	On/Off	●	45 °C	14.05.11 - 15.04.2014	Yes No	
		Generator speed	On/Off	●		14.05.11 - 15.04.2014	Yes No	
		Vibration	On/Off	●		14.05.11 - 15.04.2014	Yes No	Write
		Bearing, gearbox lubrication	On/Off	●		14.05.11 - 15.04.2014	Yes No	
		Hydraulic oil level	On/Off	●		14.05.11 - 15.04.2014	Yes No	
		Rotor speed (gear tooth)	On/Off	●		14.05.11 - 15.04.2014	Yes No	

Figure III.8 Page Web/Base de données de serveur de télésurveillance

Dans cette page sont indiqués l'heure, la date, l'ID de l'éolienne, son adresse IP et les données reçues. Par ailleurs, le système IESCRM collabore avec l'automate central de l'éolienne pour choisir le mode de fonctionnement. Le serveur de la station de base gère et traite les informations reçues des différentes éoliennes. Les résultats de son analyse lui permettent de

prendre une décision ou d'appliquer une commande donnée, à l'aide des algorithmes de diagnostic.

## V. Simulation et analyse des résultats

Le système de contrôle et de surveillance décrit dans la section précédente est simulé, sur la base d'une tâche réaliste, par les logiciels OPNET Modeler version 14.5 [207, 208] et Proteus ISIS. Ce dernier est spécialisé dans la simulation des circuits électroniques [210, 211]. La collaboration entre ces deux logiciels est faite à l'aide des ports série virtuels de connexion. Cette simulation est réalisée pour évaluer et comparer les performances du système IESCRM pour deux technologies réseau sans fil différentes. Les scénarios élaborés avec OPNET pour le Wi-Max et pour le GPRS sous le réseau UMTS sont schématisés sur les figures III.9 et III.10. Les paramètres du système, relatifs aux deux réseaux, sont détaillés dans les tableaux III.2 et III.3.

Tableau III.2 Paramètres de simulation de l'environnement Wi-Max

Paramètres du système	
Simulation time (sec)	3600
Data traffic rate	10 Mbps
Basic rate	1.5 Mbps
Service Class Name	Gold/UGS
Antenna Gain	15 dBi
PHY profile	Wireless OFDMA 20 MHz
Max. Transmit power	0.5 Watt
Path loss	Pedestrian
BS MAC address	Distance based

Tableau III.3 Paramètres de simulation de l'environnement UMTS

Paramètres du système	
Simulation time (sec)	3600
UMTS MN cell state	CELL_DCH
UMTS RLC process time	0.015 sec
CPICH transmission Power	1Watt
Shadow fading Standard deviation	10
Processing time	0.02 sec
Path loss	Pedestrian
UMTS GMM Timer	15/30/10

Là, deux technologies différentes ont été employées : HTTP et une base de données. Les modèles des réseaux Wi-Max et UMTS étudiés sont composés de deux cellules et de deux stations de base. Ces derniers sont schématisés sur les figures III.9 et III.10. Chaque cellule contient quatre machines éoliennes fixes. Elles sont équipées des modules IESCRM pour offrir leurs services dans tout type d'application. La couverture d'une cellule est d'environ 2km carrés. Le module UMTS, illustré à la figure III.9, comprend des équipements d'utilisateurs et un

contrôleur de réseau radio RNC. Celui-ci est relié au réseau de commutation par paquet au moyen de nœud support GPRS SGSN, d'un côté et à travers le nœud passerelle de support GPRS GGSN, de l'autre. Il est à son tour connecté au réseau IP.

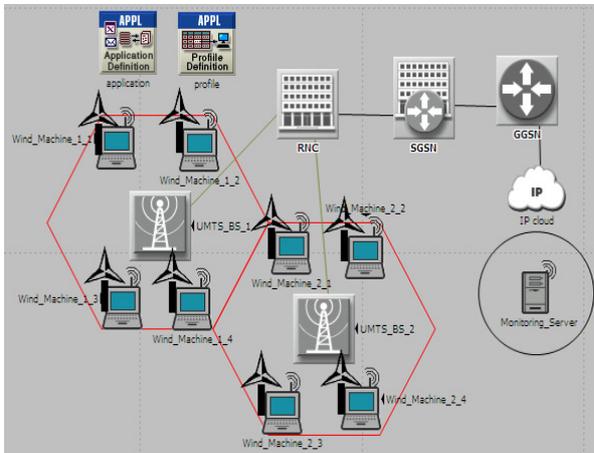


Figure III.9 Scénario d'OPNET pour la surveillance d'un parc éolien avec GPRS via UMTS

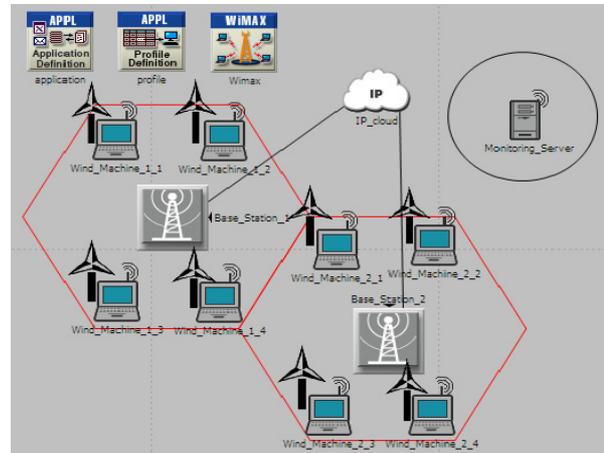


Figure III.10 Scénario d'OPNET pour la surveillance d'un parc éolien avec Wi-Max

On remarque sur les figures III.11 et III.12 que le temps de réponse moyen de la requête relative à la base de données dans le GPRS varie. Il est plus grand presque toujours que son correspondant dans le réseau Wi-Max. La figure III.13 montre par contre, que le trafic moyen de requête reçu dans la base de données augmente d'une manière significative avec le temps. Il a atteint une valeur maximale fixe pour les deux réseaux GPRS et Wi-Max.

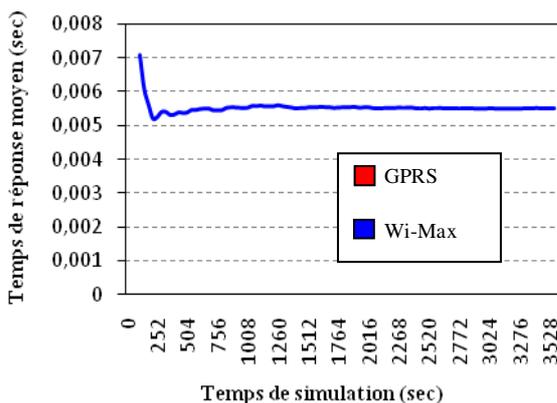


Figure III.11 Temps de réponse moyen pour une requête de la base de données via le réseau Wi-Max

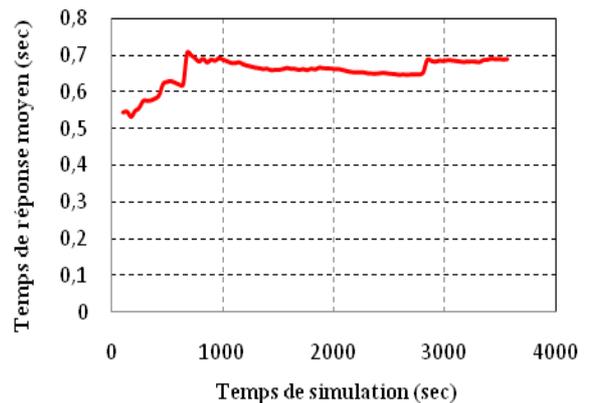


Figure III.12 Temps de réponse moyen pour une requête de la base de données via le réseau GPRS

Le trafic reçu dans le réseau Wi-Max est beaucoup plus important que celui dans le réseau GPRS. La différence entre eux est d'environ 80%.

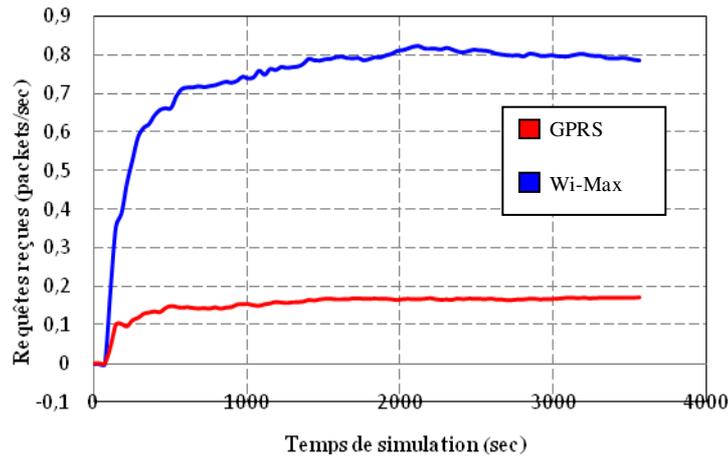


Figure III.13 Trafic moyen des requêtes reçues par la base de données

Les résultats de simulation illustrés sur les figure III.14 et III.15, montre que le réseau Wi-Max est beaucoup plus rapide surtout en affichage de page Web dans le service http. Il dépasse le réseau GPRS d'environ 187 fois en moyenne. Cette caractéristique de temps réponse d'accès à une page Web est due à une évolution instable de trafic dans le Wi-Max.

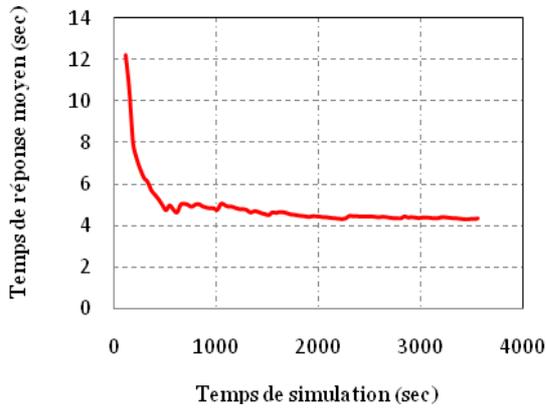


Figure III.14 Temps de réponse moyen d'accès à une page Web avec le service HTTP pour GPRS

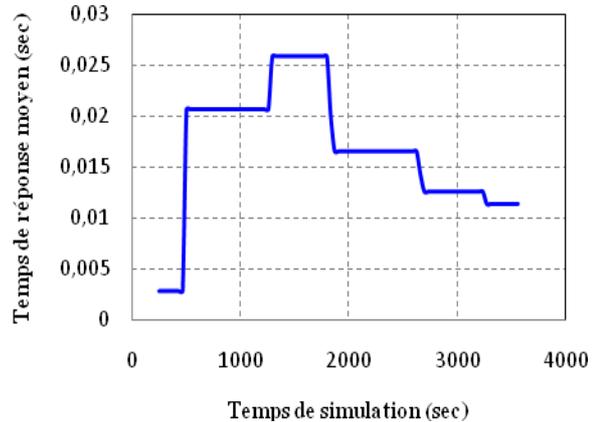


Figure III.15 Temps de réponse moyen d'accès à une page Web avec le service HTTP pour Wi-Max

L'évolution de trafic reçu par le service HTTP au moyen des deux réseaux GPRS et Wi-Max, est présentée sur la figure III.16. On remarque qu'elle est très supérieure pour le Wi-Max que pour le GPRS. Cette différence est estimée aux alentours de 94%.

Comme illustré sur les figures III.17 et III.18, le délai moyen d'activation de service pour une connexion Wi-Max est beaucoup plus grand que celui relatif au GPRS. Il est environ 137 fois. Ces résultats peuvent être justifiés par le fait que le réseau GPRS couvre une zone géographique étendue. Il ne permet la transmission de données qu'avec un débit réel atteignant une valeur pratique entre 35Kbits/s et 87Kbits/s. Ce débit est beaucoup plus inférieur à celui du réseau Wi-

Max qui peut atteindre 75Mbit/s au maximum. Ce Wi-Max gère son trafic de données avec une bande passante plus large en zone de couverture réduite, mais il n'offre pas de connexion de haute qualité.

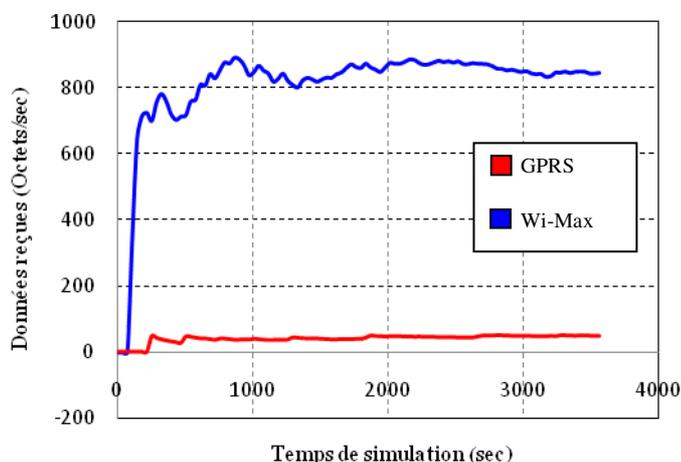


Figure III.16 Trafic moyen reçu avec le service HTTP

Le réseau Wi-Max est par exemple, favorisé et bénéfique dans l'implémentation d'un réseau de télésurveillance en parc éolien.

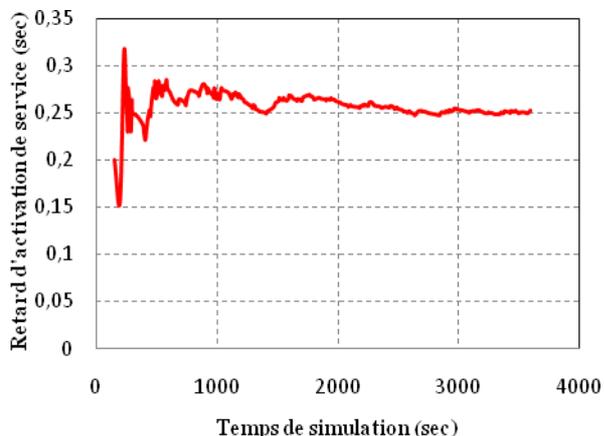


Figure III.17 Délai moyen d'activation de service au réseau GPRS

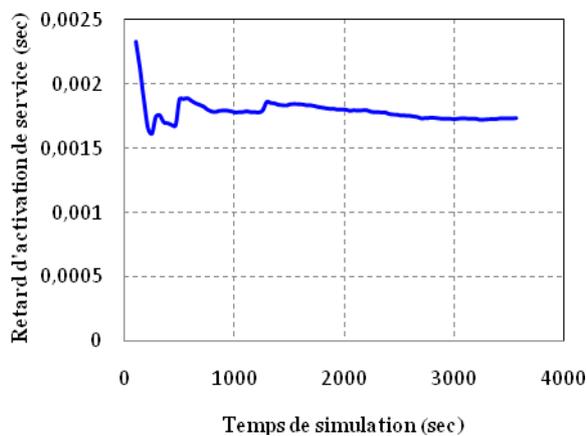


Figure III.18 Délai moyen d'activation de service au réseau Wi-Max

Le réseau GPRS lui, a une variation de vitesse d'activation de service énorme. Alors que le Wi-Max offre une large bande passante presque constante. Cela se traduit par sa capacité à offrir des services de connexion locale ou par Internet, plus rapides. C'est pour cette raison que la technologie Wi-Max reste le choix le plus approprié. Elle satisfait les exigences de qualité de service et de trafic des données en temps réel, de toute application de télésurveillance et de contrôle des éoliennes.

Le système IESRCM développé permet de suivre le fonctionnement d'une éolienne par la supervision de ses paramètres physiques. Cela à travers des capteurs bien déterminés. Cette technique présente des inconvénients lorsque ces capteurs deviennent hors service. Dans ce cas, une étude comparative de ce module proposé avec les systèmes de surveillance existants reste une tâche nécessaire. Le recours à la surveillance par l'approche d'analyse spectrale à haute résolution semble plus efficient. Le chapitre suivant aborde ce volet en détails.

# Chapitre IV

---

## Identification des défauts par estimation fréquentielle

### I. Estimation à haute résolution

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui a progressée rapidement dans ces dernières années. Toute machine éolienne fournit de l'énergie électrique propre et considérable. Elle est presque sans dépenses à l'exception d'un budget de sa construction et de son entretien. Les parcs éoliens sont généralement installés dans des endroits éloignés, difficiles à l'accès, et soumis à des conditions environnementales difficiles [116]. Leur maintenance pose un problème. Pour la faciliter, un système de télésurveillance prédictive et périodique permet de surveiller son fonctionnement et de détecter ses défauts électromécaniques. Ce système de diagnostic à distance devient essentiel pour réduire les coûts de réparation et assurer la continuité de production. En effet, pour anticiper l'arrêt définitif des éoliennes, la surveillance en ligne de leur état serait la technique la plus efficace, car elle permet d'évaluer leur état de santé en fonctionnement par l'analyse de leurs signaux mesurés en permanence [117]. Différents types de capteurs peuvent leur être installés et utilisés pour générer ces signaux physiques. Plusieurs méthodes existent et permettent d'exploiter ces indicateurs, de détecter et d'identifier les défauts de ces machines [58, 59, 212, 213]. C'est pourquoi la fiabilité des éoliennes devient un sujet important dans la recherche scientifique et dans l'industrie.

La plupart des recherches récentes ont été orientées vers la télésurveillance. Pour le cas des éoliennes, on a mis l'accent sur l'étude des courants statoriques de leurs moteurs. Parmi les méthodes les plus populaires pour le diagnostic de défauts, on cite celle d'analyse de la signature du courant CSA. Elle est plus pratique et moins coûteuse [34, 38, 40, 41]. Dans ces dernières années, nombreuses études basées sur des techniques de traitement du signal ont été investies pour déceler les défauts des machines électriques avant apparition de défaillances catastrophiques. Ces techniques sont initialement développées pour les moteurs à induction électrique. Elles peuvent actuellement être facilement adaptées aux générateurs d'éoliennes.

En effet, le développement technologique des processeurs de traitement du signal numérique DSP, le diagnostic des pannes dans les machines éoliennes peut maintenant être réalisé en temps

réel [38]. Parmi les techniques de traitement du signal, existent les méthodes non paramétriques, les méthodes paramétriques et les méthodes de haute résolution HRM. Elles sont largement adoptées dans le diagnostic des machines à induction. Elles peuvent être utilisées dans l'estimation spectrale [57-61, 95]. Toutefois, les travaux de recherche, effectués avec ces méthodes HRM, ne mettent pas en évidence les paramètres de précision, le niveau de robustesse de chaque approche et le temps de calcul écoulé. Assurer l'exécution de leurs algorithmes est un paramètre clé dans leur intégration en temps réel dans toute application de détection.

Par ailleurs, une investigation focalisée sur le calcul de l'erreur quadratique moyenne MSE et sur la variance de la détection des harmoniques caractérisant les défauts est faite pour évaluer l'exactitude et la robustesse de la détection. Celle-ci est nécessaire lorsque les paramètres du signal, contenant des informations sur les défauts, subissent des changements en fonction des contraintes de l'application [43-53]. L'objectif principal de cette étude est de rechercher une méthode de détection à haute résolution efficace convenablement adaptée pour la mise en œuvre de la supervision d'état de santé d'une éolienne.

Dans la littérature, de nombreuses études de recherche concernant l'application des outils avancés et des techniques améliorées de traitement du signal, ont été couramment utilisées dans l'analyse de courant statorique délivré par tout générateur d'éolienne. Leur but est la surveillance et le diagnostic des pannes électromécaniques d'une telle machine. Ces pannes provoquent un effet de modulation du champ magnétique dans le générateur de l'éolienne relative. Il se traduit par l'apparition des harmoniques (sous forme de pics) dans le spectre fréquentiel du courant statorique [38-42]. Néanmoins, ces techniques sont inappropriées, parce qu'elles ont des inconvénients tels que la complexité élevée, la résolution dégradée, etc. Cependant, certains défauts sont caractérisés par des comportements non stationnaires [34, 38]. Pour cette raison, certains chercheurs s'intéressaient en particulier à des méthodes adaptées aux signaux non-stationnaires. Parmi ces méthodes, l'analyse temps-fréquence, le spectrogramme, la décomposition en ondelettes (scalogramme), la représentation de Wigner-Ville, la Transformée de Concordia CT et la Transformée de Hilbert-Huang [42], [63-73].

Le périodogramme et ses extensions, évaluées par la transformée de Fourier rapide FFT n'est pas un estimateur cohérent de densité spectrale de puissance PSD puisque sa variance ne tend pas vers zéro lorsque la longueur de données tend vers l'infini. Dans plusieurs travaux de recherche, le périodogramme a été largement utilisé dans la détection de défauts des machines électriques à induction [38], [64]. La FFT ne donne aucune information sur l'instant d'apparition de toute composante fréquentielle (pic). Par conséquent, l'approche de Transformée Fourier à

fenêtre glissante STFT est utilisée pour éliminer cette lacune. Son inconvénient est qu'elle nécessite un temps d'échantillonnage plus grand pour avoir une bonne résolution en fréquence [65]. La discrimination des composantes fréquentielles, contenues dans le signal est limitée par la longueur de la fenêtre choisie [155]. Par ailleurs, la transformée en ondelettes discrète DWT est utilisée dans [56], [100] pour diagnostiquer les défaillances liées aux conditions transitoires. Elle est en effet, appliquée dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne pour faire des résolutions différentes des fréquences. Cette méthode facilite l'interprétation du signal, car elle tient compte de toutes les informations contenues dans le signal par une distribution temps-fréquence. Une des limites de cette technique réside dans le fait qu'elle offre en hautes fréquences, une bonne résolution temporelle et une mauvaise résolution fréquentielle. Cependant, elle fournit une bonne résolution fréquentielle et une faible résolution temporelle en basses fréquences [67, 68].

En général, les méthodes paramétriques n'ont pu améliorer la performance de résolution fréquentielle que lorsqu'elles sont affectées avec un bon rapport signal sur bruit SNR [68, 69]. Ces méthodes modernes se basent sur le calcul de la covariance matricielle du signal. La détermination de rang de cette matrice permet de diviser l'espace des données (échantillons du signal acquis) en deux ensembles. Le sous-espace signal engendré par des sinusoides, et le sous-espace bruit qui est son complémentaire orthogonal. Les méthodes à haute résolution HRM offrent une plus grande robustesse en comparaison avec les techniques de prédiction linéaire.

En outre, les méthodes HRM ont la capacité de détecter des fréquences à un faible SNR. Pour cette raison, elles sont souvent utilisées dans les antennes de communication. Elles ont été introduites dans le développement de diagnostic des défauts des machines électriques. Ce sont des moteurs électriques à induction et des générateurs de courant d'éoliennes. En effet, l'application de la méthode classification multiple du signal MUSIC dépendante de l'espace bruit et de ses versions zoom conjugués a amélioré la détection par l'identification d'un grand nombre de fréquences [67-73, 75-81]. En addition, les méthodes d'analyse propre sont particulièrement appropriées au cas où les composantes du signal sont des sinusoides corrompues par un bruit blanc additif. Ces algorithmes sont basés sur une décomposition propre de la matrice de corrélation du signal corrompu par un bruit. Une autre approche utilisée s'appuyant sur l'espace signal, est la méthode ESPRIT [74], [85]. Elle permet la détermination des composantes harmoniques avec une grande précision. En fait, on examine ici les techniques à haute résolution, les plus efficaces dans la détection des défauts d'une éolienne, à l'aide de son courant statorique.

## II. Modélisation des défauts de la machine éolienne

La détection et l'identification (diagnostic) des défauts dans les systèmes électromécaniques ont une grande importance pratique. Plus qu'elles sont précoces plus qu'elles permettent d'éviter la détérioration de ces machines et la dégradation de leurs performances. Elles permettent également d'assurer la sécurité des gents manipulateurs de ces machines. Le diagnostic rapide et correct de chacune de leurs composantes défectueuses, facilite son entretien, permet des décisions adéquates en cas critiques et d'urgence et entraîne la réalisation des bonnes actions correctives et réparatrices.

La conception d'un moteur électrique ou d'un générateur de courant impose d'avoir une symétrie électrique et mécanique dans son stator et dans son rotor. Cette condition est nécessaire pour assurer un meilleur couplage et réaliser une grande efficacité de fonctionnement. A cause de l'environnement industriel difficile, toute machine électrique y utilisée est potentiellement exposé aux risques de disfonctionnement, provoqués par des pannes inattendues d'origine électrique, mécanique ou chimique. Les raisons de ces pannes sont multiples. Elles peuvent être comme suit [38, 59]:

- Dépassement de la durée de vie nominale des composantes mécaniques ;
- Mauvaise valeur nominale de puissance;
- Alimentation instable de tension ou de courant ;
- Surcharge ou charge déséquilibrée ;
- Contraintes résiduelles de la fabrication ;
- Erreurs pendant les réparations ;
- Environnement dur d'application (présence de poussière, de fuites d'eau, de vibrations, de contamination chimique, de haute température, etc.) ;

L'éolienne comme toute machine électrique tournante peut avoir diverses défaillances électromécaniques. Elles peuvent principalement affecter cinq de ses composantes : son stator, son rotor, ses roulements, sa boîte à vitesses et/ou son espace d'air (excentricité) [76-80]. Ces défauts nécessitent une détection prédictive afin d'éviter tout effet secondaire. Il peut causer une panne ou un dommage fatal. À cause de ces raisons et des motifs indiqués dans la littérature [118, 119, 212, 213] ces défauts nécessitent une surveillance périodique pour éviter toute détérioration imprévue. Il y a donc une nécessité de modéliser tout type de signature de défaut censé d'apparaître lors du fonctionnement de cette machine éolienne. Chacun de ces défauts est traduit par un symptôme anormal pendant le fonctionnement de la machine. Il est décrit comme un phénomène particulier pouvant être:

- Une vibration mécanique ;
- Une augmentation de la température ;
- Un couplage d'entrefer irrégulier ;
- Une variation de puissance de sortie instantanée ;
- Un bruit acoustique ;
- Une variation de tension ou de courant de ligne ;
- Une variation de vitesse de rotor, etc. ;

La plupart des symptômes anormaux ont été recensés pour développer des modèles spécifiques concernant chaque état de défaillance de l'éolienne et de sa sévérité. La meilleure façon d'analyser chaque symptôme et d'obtenir des informations sur son évolution est notamment sa fréquence, sa durée, son amplitude, sa variance et sa phase. En effet, son diagnostic se base sur l'analyse des harmoniques contenues dans le courant d'alimentation de la machine, de son flux, de son couple ou de sa vitesse de rotation. Des méthodes avancées sont appliquées dans ce cas. Elles sont développées avec l'analyse spectrale des signaux issus de cette machine ou avec la comparaison de comportement d'installation réelle à celle attendue sur la base d'un modèle mathématique.

Plusieurs recherches ont été dirigées vers l'exploitation du courant statorique de cette éolienne. On analyse en particulier, le spectre de ce courant pour extraire les composantes fréquentielles introduites par le défaut survenu. Les défauts d'éolienne les plus fréquents et leurs fréquences connexes sont présentés sur le tableau IV.1.

Tableau IV.1 Signature fréquentielle des défauts d'éolienne

Défauts	Fréquences d'Harmoniques	Paramètres
Barres rotoriques cassées (Broken rotor bars)	$f_{brb} = f_0 \left[ k \left( \frac{1-s}{p} \right) \pm s \right]$	$k = 1, 3, 5, \dots$
Roulements endommagés (Bearing damage)	$f_{bng} =  f_0 \pm k f_{i,o} $	$k = 1, 3, 5, \dots$ $f_{i,o} = \begin{cases} 0.4 n_b f_r \\ 0.6 n_b f_r \end{cases}$
Désalignement (Misalignment)	$f_{mis} =  f_0 \pm k f_r $	$k = 1, 3, 5, \dots$
Excentricité d'entrefer (Air gap eccentricity)	$f_{ecc} = f_0 \left[ 1 \pm m \left( \frac{1-s}{p} \right) \right]$	$m = 1, 2, 3, \dots$

Où  $f_0$  est la fréquence d'alimentation électrique,  $s$  est le glissement par unité,  $P$  est le nombre de pôles,  $f_r$  est la fréquence du rotor,  $n_b$  est le nombre des billes d'un roulement,  $m$ ,  $k$  sont des nombres entiers enfin  $f_{i,o}$  est toute fréquence intérieure ou extérieure. Elle dépend des dimensions et des caractéristiques de vibration des roulements [38, 68, 69, 78-81, 116, 117, 119].

En effet, Il est possible avec des signatures spectrales connues, d'analyser certaines bandes de fréquences pour identifier le type de défaut affectant la machine.

### III. Modélisation du courant statorique du générateur d'éolienne

La détection des défauts dans les machines à induction électrique a été largement étudiée. Elle est basée sur la surveillance de leurs vibrations. La fiabilité des résultats obtenus est fortement dépendante de la position des accéléromètres placés sur ces machines et allongés sur leurs axes verticaux, axiaux et radiaux. Cet emplacement est en fait, la tâche difficile de cette technique de modélisation de vibration. En plus, elle est susceptible d'être également altérée par la variation de vitesse de la machine, surtout lorsque les composantes mécaniques sont détériorées. Cependant, ces techniques sont coûteuses, car elles nécessitent des transducteurs supplémentaires. Leur utilisation n'a de sens que dans le cas des grandes machines ou des applications critiques.

La surveillance des lignes de courant statorique est en effet, la base de modélisation, la plus intéressante et la plus attrayante pour la détection des défauts. Cela est ainsi pour deux principales causes. D'abord, le courant statorique peut être utilisé pour diagnostiquer les défauts électriques et mécaniques tels que: déséquilibre de phase, court-circuit dans les enroulements de stator, défaillance des roulements, arbre tordu, barre cassée, etc. Ensuite, le courant statorique est très facile d'y accéder, parce qu'il est directement mesurable et il est utilisé pour commander la machine elle même. Cela offre un avantage important aux techniques de modélisation indiquées.

L'application de la technique d'analyse de courant statorique CSA pour le diagnostic des défauts de la machine éolienne nécessite une connaissance précise des diverses composantes de fréquence et d'amplitude contenues dans le spectre fréquentiel du courant statorique. Ce courant est prélevé de générateur de l'éolienne. En effet, son analyse permet la discrimination correcte des modulations et des signatures des défauts de l'éolienne. Pour cela, il est nécessaire de construire un signal complexe qui modélise le phénomène physique réel. Ce modèle analytique du signal doit décrire précisément le comportement et l'évolution du courant statorique réel. Il doit contenir toutes les informations des défauts correspondants. Ce courant est souvent utilisé pour des fins de commande et de contrôle.

Pour étudier la détection des défauts mentionnés, le courant statorique du générateur d'éolienne est désigné par le signal discret  $x[n]$ . Nous l'avons obtenu par échantillonnage de courant continu  $x(t)$  avec un pas égal à  $T_s=1/F_s$ . Ce courant statorique  $x[n]$  de la machine à

induction électrique en présence des défaillances mécaniques et/ou électriques est exprimé comme suit [68, 69, 79-80] :

$$x[n] = \sum_{k=-L}^L a_k \cos \left( 2\pi f_k (\omega(n)) \times \left( \frac{n}{F_s} \right) + \varphi_k \right) + b[n] \quad (\text{IV.1})$$

Où  $x[n]$  correspond au  $n^{\text{ième}}$  échantillon du courant statorique.  $b[n]$  est un échantillon de bruit. Ce dernier est gaussien, de moyenne nulle et d'une variance égale à  $\sigma^2 = 10^{-4}$ . Le paramètre  $L$  est le nombre des fréquences latérales introduites par des défauts de fonctionnement. Les grandeurs  $f_k(\omega)$ ,  $a_k$ ,  $\varphi_k$  correspondent à la fréquence, à l'amplitude et à la phase respectivement.  $\omega(n)$  est un paramètre à estimer à chaque instant d'ordre  $n$ . Il dépend de défaut étudié. On suppose que le temps et l'espace des harmoniques ne sont pas considérés. Le problème à résoudre est traité comme un problème d'estimation statistique. Il s'agit d'une estimation de la fréquence fondamentale, des fréquences caractérisant les défauts survenus et des amplitudes relatives. Elle est réalisée par le calcul du spectre de courant statorique  $x[n]$ .

#### IV. Méthodes d'estimation et application

On va présenter ci après, une brève description de certaines méthodes d'estimation à haute résolution. En effet, on va détailler leurs principales caractéristiques. Les méthodes d'estimation fréquentielle utilisent le sous-espace de bruit et celui de signal. Elles sont basées sur la propriété d'avoir les vecteurs propres de la matrice d'auto-corrélation Toeplitz (voir Annexe I), relatifs au sous-espace bruit sont orthogonaux aux vecteurs propres relatifs au sous-espace signal. Toute matrice dite Toeplitz a les parallèles de sa diagonale principale constituées par des coefficients égaux. Ce type de matrices est d'usage fréquent en calcul de la covariance matricielle. Le modèle du signal est supposé dans ce cas, une somme de sinusoïdes aléatoires noyées dans un bruit de covariance connue. À la différence des méthodes dépendantes de périodogramme, même avec le fenêtrage, les méthodes à haute résolution HRM sont de telle sorte que l'erreur tend vers zéro lorsque le rapport SNR est bien adapté.

L'application de ces méthodes dans le domaine de détection des défaillances électromécaniques des machines à induction électrique est basée sur la procédure décrite sur la figure IV.1.

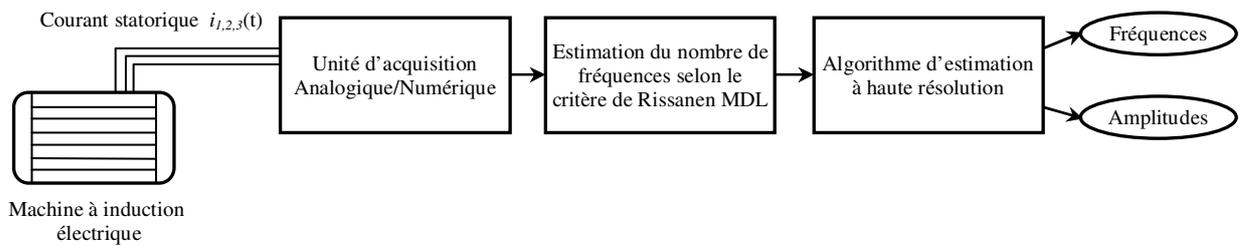


Figure VI.1 Procédure de détection des défauts avec une HRM

Pour extraire correctement les harmoniques caractérisant des défauts ainsi que leurs amplitudes, on commence par l'acquisition des échantillons numériques du signal de courant statorique triphasé, issu de la machine en question. Ensuite, on réalise une estimation de nombre de fréquences suspectes, contenues dans ce signal. Ce nombre étant connu, l'algorithme de toute méthode HRM est dans ce cas, applicable sur le signal acquis. Cela permet d'extraire toutes les composantes fréquentielles se trouvant dans ce signal. L'évaluation de robustesse pour une telle méthode se base sur deux critères de performance. On va les aborder en détails ultérieurement. Il s'agit de :

- Temps de calcul ;
- Erreurs d'estimation fréquentielle et d'amplitude ;

#### IV.1 Méthode de Prony

Parmi les HRM, existe la méthode de Prony. Elle est en effet, fondée par Prony et publiée en 1795. Elle a été utilisée en modélisation des données échantillonnées en tant que combinaison linéaire de fonctions exponentielles. Elle permet d'estimer une somme d'exponentielles par des techniques de prédiction linéaire. C'est avec cette méthode qu'on peut extraire  $P$  signaux sinusoïdaux et exponentiels d'une série des données temporelles. Cela est faisable en résolvant des équations linéaires [43-54]. En effet, on suppose avoir le signal  $x(n)=s(n)+b(n)$ . Les fonctions  $b(n)$  et  $s(n)$  sont respectivement un bruit et un signal supposé égal à une somme de sinus amorties de fréquences  $f_k$  vérifiant l'équation récursive suivante:

$$s(n) + b_1 s(n-1) + \dots + b_{2P} s(n-2P) = 0 \quad (\text{IV.2})$$

$$A(z) = z^{2P} + b_1 z^{2P-1} + \dots + b_{2P} \quad (\text{IV.3})$$

La fonction Polynômiale  $A(z)$  à coefficients réels a  $2P$  racines complexes conjuguées sur le cercle unité. Ces racines sont données par:

$$z_k = \rho_k e^{\pm 2\pi j f_k} \quad (\text{IV.4})$$

Il est possible de calculer  $b_k$ , puis les racines  $z_k$  ce qui permet de calculer les fréquences  $f_k$  et les coefficients d'amortissement  $\rho_k$  à partir des racines du polynôme  $A(z)$ .

Si on part de :

$$x(n) + b_1x(n-1) + \dots + b_{2P}x(n-2P) = \varepsilon(n) \quad (\text{IV.5})$$

Dans ce cas, le problème d'estimation est basé sur la minimisation de l'erreur quadratique  $\varepsilon^2$ .

En empilant les  $(N-2P)$  équations obtenues depuis  $(n=2P)$  jusqu'à  $(n=N-1)$ , on obtient :

$$\begin{aligned} x(2P) + b_1x(2P-1) + \dots + b_{2P}x(0) &= \varepsilon(2P) \\ x(2P+1) + b_1x(2P) + \dots + b_{2P}x(1) &= \varepsilon(2P+1) \\ \vdots & \\ x(N-1) + b_1x(N-2) + \dots + b_{2P}x(N-2P-1) &= \varepsilon(N-1) \end{aligned} \quad (\text{IV.6})$$

Cela peut être réécrit en forme matricielle :

$$D.b = e \quad (\text{IV.7})$$

$D$  est une matrice  $(N-2P) \times (2P+1)$  constituée à partir des données.

$$b = [1 \quad b_1 \quad \dots \quad b_{2P}]^T \quad (\text{IV.8})$$

$b$  est donc un vecteur associé aux coefficients de polynôme  $A(z)$ . Pour estimer  $b$ , la méthode de Prony permet de minimiser le scalaire :

$$e^T . e = b^T . D^T . D . b \quad (\text{IV.9})$$

La contrainte de cette minimisation est avoir la première composante de  $b$  égale à 1.

Si on pose :

$$\begin{aligned} u &= [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \\ R &= D^T . D \end{aligned} \quad (\text{IV.10})$$

La matrice  $R$  est la covariance de signal  $x(n)$ . C'est une matrice carrée  $(2P+1) \times (2P+1)$ . Le problème à résoudre est donc de la forme :

$$\begin{cases} \min(b^T . R . b) \\ b^T . u - 1 = 0 \end{cases} \quad (\text{IV.11})$$

En utilisant la méthode des multiplications de Lagrange, on peut substituer le problème formulé en (IV.11) par son équivalent suivant :

$$\begin{cases} \min\{b^T . R . b - \lambda (b^T . u - 1)\} \\ b^T . u - 1 = 0 \end{cases} \quad (IV.12)$$

En dérivant la première équation par rapport à  $b$ , on trouve :

$$R . b = \lambda . u \quad (IV.13)$$

Cela donne :

$$b = \lambda . R^{-1} . u \quad (IV.14)$$

Si on prend en considération la contrainte indiquée, on écrit :

$$\lambda . u^T . R^{-1} . u - 1 = 0 \quad (IV.15)$$

En se basant sur cette dernière équation, on détermine  $\lambda$ . On obtient finalement :

$$b = \frac{1}{u^T . R^{-1} . u} R^{-1} u \quad (IV.16)$$

Théoriquement le polynôme construit à partir des éléments de  $b$  a toutes ses racines sur le cercle unité. Pour les obtenir on peut soit calculer directement ses racines, soit évaluer avec la FFT, l'expression  $G(f)$  et déterminer ensuite ses maximas. Ceux-ci sont théoriquement en nombre infini.

$$G(f) = \frac{1}{|1 + b_1 e^{-2j\pi f} + \dots + b_{2P} e^{-4Pj\pi f}|} \quad (IV.17)$$

## IV.2 Méthode de Pisarenko

La décomposition harmonique de Pisarenko PHD d'un signal  $x(n)$ , dépend de la décomposition propre de sa matrice de corrélation. Elle permet d'établir un sous-espace de signal et un autre de bruit. Cette procédure est la base des méthodes d'estimation fréquentielle. Elle a une utilité pratique limitée en raison de sa sensibilité au bruit [43-53, 82]. L'algorithme de cette méthode est résumé comme suit :

- Avec la méthode de covariance, on estime la matrice  $R_x$  d'ordre  $(2P+1)$  à partir d'un enregistrement de taille  $N$ , comme suit :

$$\hat{R}_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) . x^H(n) \quad (IV.18)$$

- Ensuite, on calcule la décomposition de  $R_x$ . On en déduit le vecteur propre  $v$  associé à sa plus petite valeur propre.

- On construit avec le vecteur  $v$  le polynôme  $A(z)$  de degrés  $2P$ . On extrait ses racines :

$$z_k = e^{2\pi j f_k} \quad (\text{IV.19})$$

De cette équation on en déduit les fréquences  $f_k$  :

$$f_k = \frac{1}{2\pi} \arg(z_k) \quad (\text{IV.20})$$

Le calcul des racines de polynôme  $A(z)$  sur le cercle unité, se fait à l'aide de la FFT appliquée à ses coefficients sur un grand nombre de points. Puis, on cherche les minimas différents à zéro. Les fréquences se déduisent alors des racines du polynôme prédicteur.

### IV.3 Méthode MUSIC

Cette méthode MUSIC est une version améliorée de l'approche de Pisarenko. Dans celle-ci, l'espace est divisé en sous-espace signal et sous-espace bruit à l'aide de nombreux filtres. La taille de la fenêtre temporelle d'observation est prise de telle sorte qu'elle soit égale à  $(C > P+1)$ . Par conséquent, la dimension du sous-espace bruit est supérieur à 1 et égale à  $C-P$ . Cette méthode permet d'estimer le sous-espace bruit par moyennage à partir des échantillons disponibles. Cela donne une meilleure estimation fréquentielle. Il est faisable par décomposition en valeurs propres de la matrice de corrélation estimée ou par décomposition en valeurs singulières de la matrice des données. Une fois la décomposition propre de la matrice de corrélation est calculée, elle est utilisée dans la détermination de la matrice  $G$  de dimensions  $(C \times (C-P))$ . Celle-ci est construite à partir des  $(C-P)$  vecteurs propres associés aux  $(C-P)$  plus petites valeurs propres. Par la suite, la matrice  $GG^H$  de dimensions  $(C \times C)$  est calculée pour trouver les coefficients de l'équation polynômiale suivante (IV.20), [43-54, 72] :

$$\tilde{Q}(z) = [z^{C-1} \dots z \ 1] G G^H [1 \ z \dots \ z^{C-1}]^T \quad (\text{IV.21})$$

Ensuite, l'estimation des fréquences d'ordre 1 à  $P$ , peut être obtenue comme suit :

$$f_k = \frac{\theta_k}{2\pi} \quad (\text{IV.22})$$

Deux possibilités sont offertes :

- 1) Calculer les  $2(C-1)$  racines de  $\tilde{Q}(z)$  en maintenant stables les  $P$  racines, les plus proches du cercle unité. Cette technique s'appelle la méthode Root-MUSIC ;
- 2) Trouver les  $P$  minimas, en utilisant la FFT. Cette approche s'appelle la méthode FFT-MUSIC ;

#### IV.4 Méthode des vecteurs propres EV

Plusieurs méthodes des vecteurs propres ont été proposées pour l'estimation spectrale des exponentielles complexes. Parmi celles-ci, on trouve la méthode des vecteurs propres EV. C'est une technique comparable à l'algorithme MUSIC. La méthode EV permet d'estimer les fréquences exponentielles à partir des sommets de spectre propre suivant [43-53] :

$$\hat{P}_{EV}(f) = \frac{1}{\sum_{i=p+1}^M \frac{1}{\lambda_i} |e(f)v_i^H|^2} \quad (\text{IV.23})$$

Où les  $\lambda_i$  sont les valeurs propres associées aux vecteurs propres  $v_i$ .  $e$  est le vecteur de direction. Il contient les fréquences recherchées. La seule différence entre l'approche MUSIC et celle EV est l'utilisation des valeurs propres inverses. Les  $\lambda_i$  sont aussi les valeurs propres de la matrice d'auto-corrélation  $R_x$ . En plus de sa compensation à la distorsion, ce procédé EV produit moins de pics parasites que la méthode MUSIC.

#### IV.5 Méthode de norme minimale MN

Cette méthode est celle de décomposition propre. C'est un algorithme de norme minimale MN. Dans cette approche, on utilise un seul vecteur  $\alpha$  pour l'estimation fréquentielle. On n'a pas besoin de former un spectre propre utilisant tous les vecteurs propres. Cette méthode est donc basée sur la projection du vecteur du signal  $e_k$  sur l'ensemble de sous-espace bruit [43-53] :

$$e_k = \left[ 1 \quad e^{j2\pi f_k} \quad \dots \quad e^{j(N-1)2\pi f_k} \right]^T \quad (\text{IV.24})$$

Les fréquences des exponentielles complexes sont estimées à partir des pics du spectre fréquentiel, donné par l'équation suivante :

$$\hat{P}_{MN}(e^{j2\pi f_k}) = \frac{1}{|e^H \alpha|^2}, \quad \alpha = \lambda P_n u_1 \quad (\text{IV.25})$$

Où  $P_n$  est une matrice obtenue par projection de  $e_k$  sur le sous-espace bruit. Les  $\lambda$  sont les valeurs propres de la matrice d'auto-corrélation du signal.

Si la séquence d'auto-corrélation est connue de façon précise, alors  $|e^H \alpha|^2$  aura des valeurs nulles à des fréquences de chaque exponentielle complexe. Par conséquent, la transformée en  $z$  des coefficients qui se trouvent dans  $\alpha$  peut être factorisée en tant que :

$$A(z) = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k z^{-k} = \prod_{k=1}^p (1 - e^{j2\pi f_k} z^{-1}) \prod_{k=p+1}^{N-1} (1 - z_k z^{-1}) \quad (\text{IV.26})$$

Pour  $k = p+1, \dots, N-1$ . Les  $z_k$  sont les racines parasites existantes hors du cercle unité. Le problème est de déterminer le vecteur de sous-espace bruit permettant de réduire au minimum les effets des zéros parasites sur les sommets de  $\hat{P}_{MN}$ . L'algorithme de norme minimale consiste donc à trouver un vecteur  $\alpha$  vérifiant les trois contraintes suivantes :

1.  $\alpha$  est un vecteur appartenant au sous-espace bruit;
2.  $\alpha$  est un vecteur ayant une norme euclidienne minimale;
3.  $\alpha$  est un vecteur ayant 1 comme première composante.

La première contrainte assure que les  $p$  racines de  $A(z)$  sont situées sur le cercle unité. Tandis que la deuxième contrainte garantit l'emplacement des racines parasites de  $A(z)$  à l'intérieur du cercle unité :

$$|z_k| < 1 \quad (\text{IV.27})$$

La troisième contrainte peut être exprimée comme suit :

$$\alpha^H u_1 = 1 \quad (\text{IV.28})$$

$$u_1 = [1, 0, \dots, 0]^T \quad (\text{IV.29})$$

## IV.6 Méthode ESPRIT

La méthode ESPRIT est celle d'estimation des paramètres du signal par la technique d'invariance rotationnelle. C'est un algorithme permettant la détermination et la détection des harmoniques avec une très grande précision d'estimation de fréquence et d'amplitude. Cela est indépendant de la taille de fenêtrage utilisée. C'est une approche appropriée pour avoir des résultats d'estimation spectrale fiables et sans effets de synchronisation [43-53, 61, 74, 84, 85]. Elle est fondée sur l'invariance à décalage. Elle existe naturellement entre la série temporelle discrète conduisant à une invariance rotationnelle et les sous-espaces signal correspondants. Dans ce cas, les vecteurs propres  $U$  de la matrice d'auto-corrélation de signal définissent deux sous-espaces (signal et bruit) en utilisant deux matrices de sélection  $\Gamma_1$  et  $\Gamma_2$ .

$$S_1 = \Gamma_1 U, \quad S_2 = \Gamma_2 U \quad (\text{IV.30})$$

L'invariance rotationnelle entre les deux sous-espaces conduit à l'équation suivante :

$$S_1 = \Phi S_2 \quad (\text{IV.31})$$

Où:

$$\Phi = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j2\pi f_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{j2\pi f_N} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.32})$$

La matrice  $\Phi$  contient toutes les informations sur les  $N$  composantes fréquentielles. Les matrices estimées  $S_1$  et  $S_2$  peuvent contenir des erreurs [179]. En outre, l'approche de total des moindres carrés TLS permet de trouver la matrice  $\Phi$  par minimisation de la norme de Frobenius relative à la matrice d'erreur. La détermination de cette matrice permet d'obtenir les estimations de la fréquence définie par la formule suivante :

$$f_k = \frac{\text{Arg}(\Phi_{k,k})}{2\pi}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (\text{IV.33})$$

L'application de toutes ces méthodes permet de réaliser ci-après, une comparaison entre leurs performances. Elles sont utilisées dans la détection des défauts pouvant se produire au sein d'une machine éolienne [197].

## V. Critères de robustesse d'estimation

La performance des méthodes indiquées, a été largement étudiée dans la littérature, en particulier dans le contexte d'estimation de la direction d'arrivée DOA [54, 66, 74-76].

Dans ce qui suit, on décrit l'évaluation de l'efficacité de ces méthodes détectrices de défauts, leur vitesse de calcul, leur précision et leur degré de dispersion d'estimation fréquentielle. Cela est réalisé pour différents niveaux du rapport signal sur bruit SNR et pour des valeurs fixes d'amplitude de défauts.

La détection de la sévérité des anomalies est également étudiée en faisant varier les amplitudes de défaut dans l'intervalle  $[0, 0.2a_0]$ . Les méthodes d'estimation fréquentielle précédentes sont appliquées en plusieurs scénarios. Cette application est une simulation sous Matlab [192] en considérant un générateur d'éolienne défectueux et en utilisant deux pôles pairs avec les valeurs nominales 4kW/50Hz, 230/400V.

Le courant statorique induit de générateur d'éolienne est simulé en utilisant le modèle du signal décrit dans (IV.1). Il est illustré dans la figure IV.2 sur une fenêtre d'observation de largeur 0,25 second. Cela est réalisé pour les différents cas de défaillance décrits dans le tableau IV.1. Les paramètres de la simulation indiquée, sont illustrés dans le tableau IV.2 et dans le

tableau IV.3. Les  $(f_k(\omega) = f_k(f_0, s, p, k, m))$  sont des paramètres à estimer à chaque instant  $n$  selon les cas de défauts étudiés. Pour alléger le calcul des estimations fréquentielles, on a choisi la taille de la matrice d'auto-corrélation du signal étudié  $M = 11$ .

Tableau IV.2 Paramètres utilisés dans la simulation du courant statorique avec défauts

Paramètre	Valeur
$S$	0,033
$L$	2
$p$	2
$m$	{1,2}
$f_0$	50 Hz
$f_r$	29,01 Hz
$n_b$	12
$k$	{1,3}
$N$	1600
$F_s$	1000 Hz
Itérations	200
SNR	[0,100]
Amplitude du Courant Statorique $a_0$	10 A
Processeur de calcul	Intel Core2 Duo T6570 2,1 GHz

Tableau IV.3 Scénarios de simulation de défauts

Défaut	Fréquences (Hz)		Amplitudes (A)		Phase (rad)	
	$f_{-1}$	$f_1$	$a_{-1}$	$a_1$	$\varphi_{-1}$	$\varphi_1$
Barres rotoriques cassées	22,53	70,83	1	1	0	0
Roulements endommagés	89,25	367,74	1	1	0	0
Désalignement	79,01	137,03	1	1	0	0
Excentricité d'entrefer	74,18	98,35	1	1	0	0

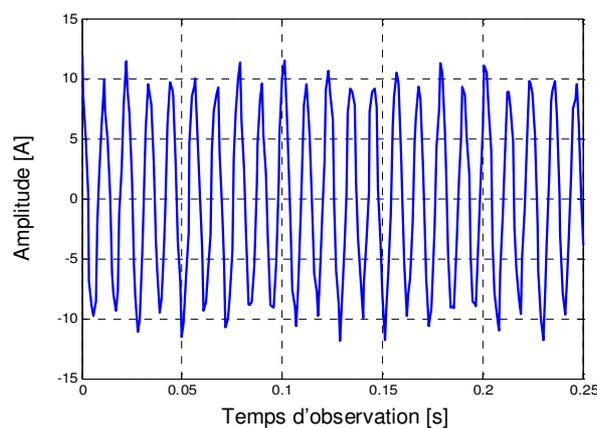


Figure VI.2 Courant statorique d'un générateur défectueux bruité (SNR=30dB)

Choisir un entre plusieurs estimateurs est une tâche difficile. Par conséquent, certains critères de qualité sont donc nécessaires pour déterminer le meilleur parmi eux. La comparaison de leurs erreurs quadratiques moyennes MSE, définies par l'équation (IV.34) est utile pour l'évaluation théorique de leurs précisions en estimation spectrale [43-45, 64, 66, 85, 86] :

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{f}_i - f_i)^2 \quad (IV.34)$$

Où:

$\hat{f}_i$  est la valeur estimée de la fréquence de défaut.

$f_i$  est la valeur exacte de la fréquence indiquant le défaut.

$N$  est le nombre d'itérations.

Par conséquent, pour chaque scénario l'amplitude des harmoniques caractérisant les défauts est fixée à  $0.1a_0$  comme indiqué dans le tableau IV.3.

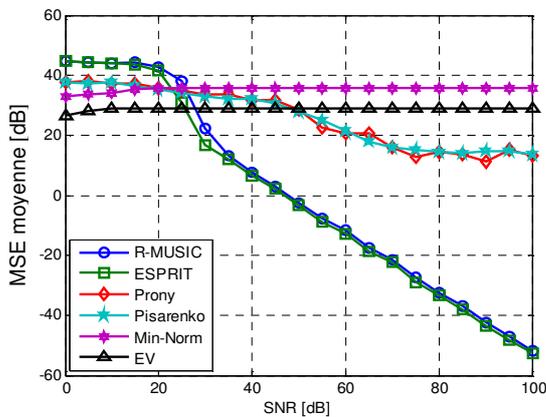


Figure VI.3 MSE moyenne de l'estimation fréquentielle des barres rotoriques cassées

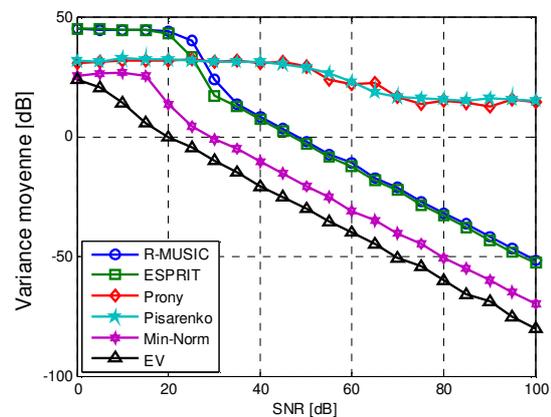


Figure VI.4 Variance moyenne de l'estimation fréquentielle des barres rotoriques cassées

Les résultats de simulation de la détection des défauts des barres rotoriques cassées sont illustrés sur les figures IV.3, IV.4. C'est une simulation d'estimation fréquentielle. Ses résultats ont permis la représentation de l'évolution de la MSE et de la variance moyenne en fonction de la variation de rapport SNR.

Pour tout courant statorique présentant un niveau de bruit élevé dans  $[0, 30\text{dB}]$ , les méthodes Root-MUSIC et ESPRIT donnent une précision presque identique et médiocre puisqu'elles ont des hautes valeurs de MSE et une grande variance presque constante. Cela peut être justifié par leur forte sensibilité au bruit. Les méthodes de Prony et Pisarenko sont aussi presque identiques. Elles présentent une précision moyenne. Elles sont suivies par la méthode de Norme Minimale MN. Après celle-ci, la technique EV s'impose avec une valeur constante de MSE et une variation accrue de la variance moyenne. Cette approche EV donne une bonne précision comparée à la MN en raison de sa résistance au bruit. Au contraire, Root-MUSIC et ESPRIT deviennent plus précises lorsque le rapport SNR augmente dans l'intervalle  $[35, 100\text{dB}]$ . Le niveau de précision de ces méthodes dépasse celui qu'ont donné Prony et Pisarenko. Elles ont une bonne valeur moyenne de certitude. La figure IV.5 présente une description statistique de

temps consacré par chaque méthode pour calculer et trouver les valeurs estimées des fréquences suspectes. On peut donc classer ces algorithmes en trois catégories :

1. Les méthodes de calcul rapide dans lesquelles on trouve MN, Prony et Pisarenko ;
2. Les méthodes de vitesse moyenne de calcul auxquelles appartiennent Root-MUSIC ;
3. Les méthodes de calcul lent dans lesquelles on a ESPRIT puis EV avec un temps de calcul très élevé ;

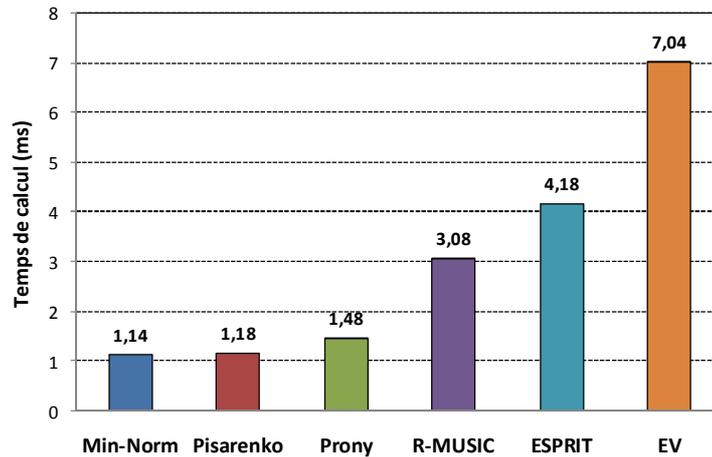


Figure VI.5 Temps de calcul moyen pour la détection des barres rotoriques cassées par différentes MHR

Cette variation de la vitesse de calcul pour chaque méthode peut être justifiée par la taille de la matrice d'auto-corrélation  $M$  du signal de courant statorique et par le calcul effectué pour former la matrice de covariance. Cela est justifié aussi par la taille des échantillons de courant statorique et par la valeur de la fréquence d'échantillonnage utilisée dans cette dernière. En détection des défauts des roulements intérieurs par l'estimation fréquentielle, on peut noter que la précision de ces méthodes est fixée en trois niveaux.

En se basant sur les résultats de simulation illustrés sur les figures IV.6 et IV.7, le premier niveau dans lequel se trouvent ESPRIT et Root-MUSIC conduit à une même précision, même en présence d'un faible SNR, car leur variance et leur MSE diminuent rapidement avec l'augmentation du rapport SNR. La haute précision est obtenue avec les méthodes MN et EV suivies par celles de Pisarenko et Prony. Ces deux dernières offrent des valeurs de MSE et de variance presque constantes. La différence de précision remarquée, est due à l'écart existant entre les valeurs des composantes fréquentielles des défaillances estimées par les méthodes étudiées.

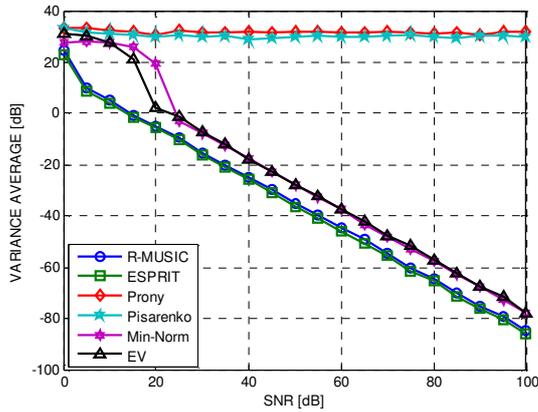


Figure VI.6 MSE moyenne de l'estimation fréquentielle relative aux roulements endommagés

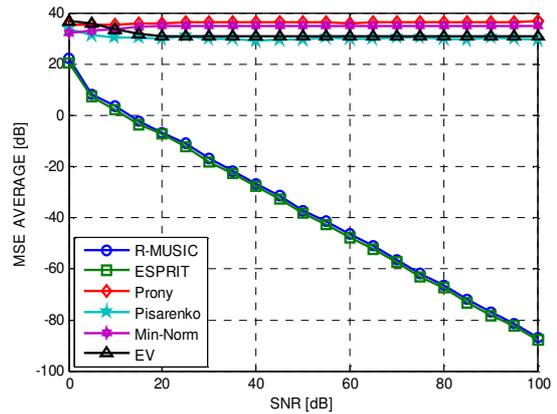


Figure VI.7 Variance moyenne de l'estimation fréquentielle relative aux roulements endommagés

On remarque aussi sur les figures IV.8, IV.11 et IV.14, que toutes ces méthodes gardent la même évolution de temps de calcul que celle observée dans le scénario de détection précédent.

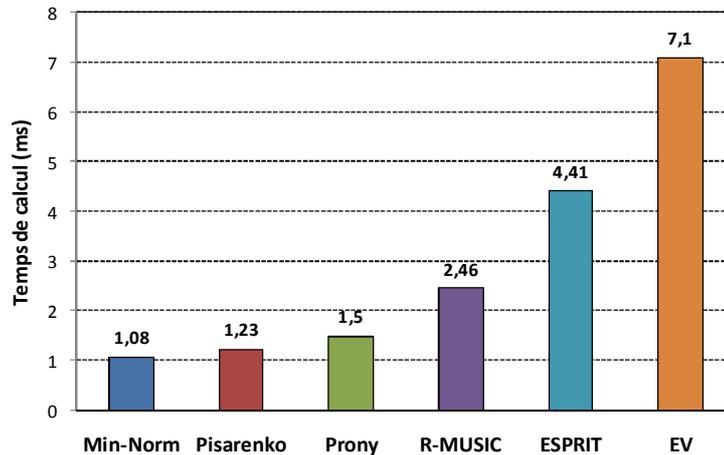


Figure VI.8 Temps de calcul moyen de la détection des roulements endommagés par différentes MHR

D'après les figures IV.9 et IV.10, la précision de détection de défaut du désalignement est très importante avec l'emploi des méthodes ESPRIT et Root-MUSIC. Elle augmente de façon significative en augmentant le rapport SNR. Alors que cette précision est modeste avec l'utilisation des techniques Prony et Pisarenko surtout pour des valeurs de SNR inférieures chacune à 30dB. Pour les autres valeurs, les méthodes EV, Prony et Pisarenko permettent presque la même précision. La méthode MN présente une précision relativement bonne mais elle n'atteint pas la rigueur des algorithmes ESPRIT et R-MUSIC.

D'après les figures IV.12 et IV.13, et pour un courant statorique bruité issu d'une génératrice d'éolienne en présence d'une défaillance d'excentricité d'entrefer, les méthodes MN et EV semblent être les meilleures en raison de leur bonne précision. Cependant, les méthodes Prony, Pisarenko, Root-MUSIC et ESPRIT donnent une grande erreur d'estimation, mais lorsque le

SNR dépasse 25dB les algorithmes Root-MUSIC et ESPRIT occupent la première place dans la précision. Ils sont suivis par ceux de Prony et Pisarenko en dépassant l’algorithme MN avec un SNR au-delà de 50dB.

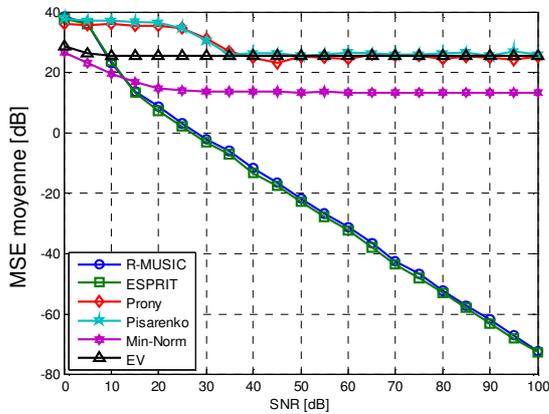


Figure VI.9 MSE moyenne de l’estimation fréquentielle du désalignement

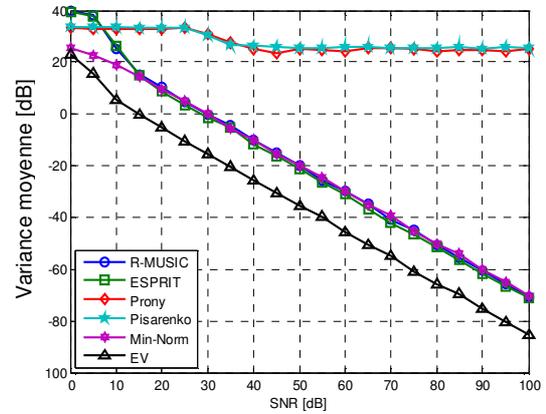


Figure VI.10 Variance moyenne de l’estimation fréquentielle du désalignement

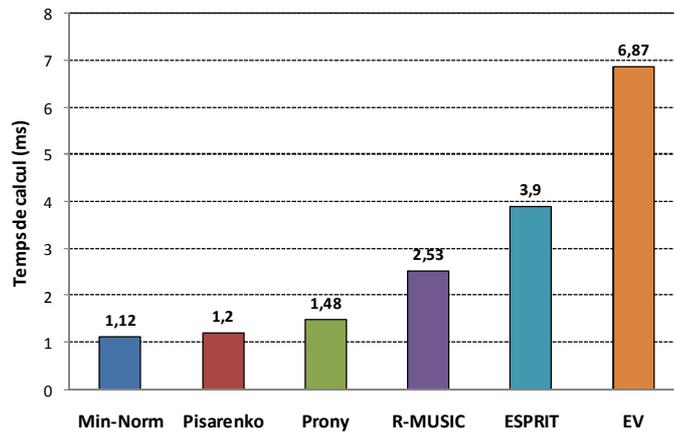


Figure VI.11 Temps de calcul moyen pour la détection du désalignement par différentes MHR

En principe, il existe quatre niveaux de précision d’estimation fréquentielle. Le meilleur degré est affecté à ESPRIT et R-MUSIC.

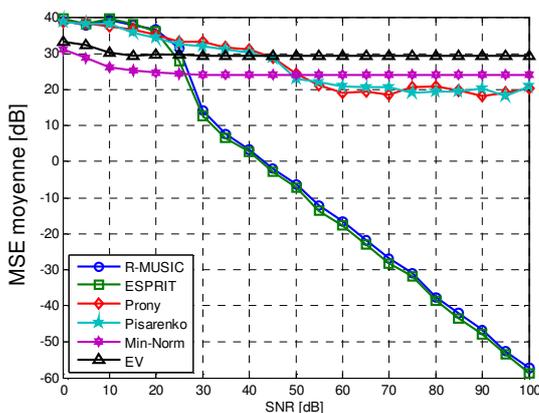


Figure VI.12 MSE moyenne de l’estimation fréquentielle d’excentricité d’entrefer

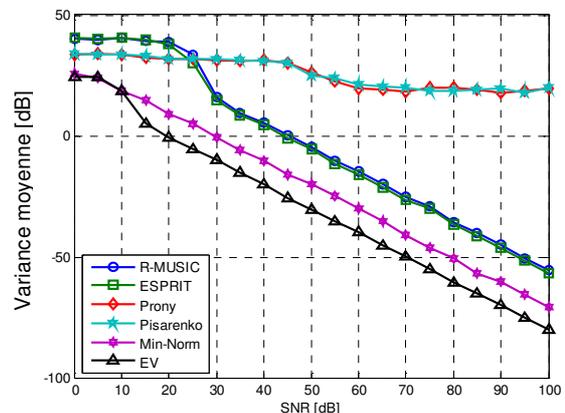


Figure VI.13 Variance moyenne de l’estimation fréquentielle d’excentricité d’entrefer

Le second est accordé à Prony et Pisarenko. Tandis que les autres degrés sont destinés à MN et EV respectivement.

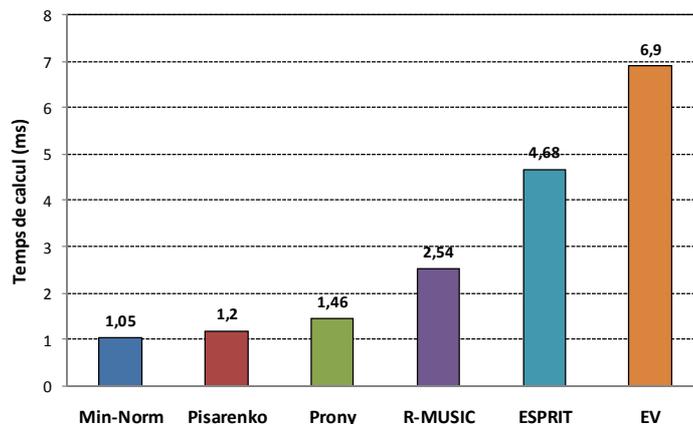


Figure VI.14 Temps moyen du calcul de la détection d'excentricité d'entrefer avec différentes MHR

Pour comparer ces méthodes de détection et d'identification des harmoniques caractérisant l'apparition des défauts électromécaniques, une simulation a été faite sous différents scénarios dans le but d'étudier l'impact de la variation de l'amplitude des harmoniques de défauts sur la précision des techniques de discrimination employées dans cette mission. Les figures IV.15, IV.16, IV.17 et IV.18 montrent les résultats obtenus.

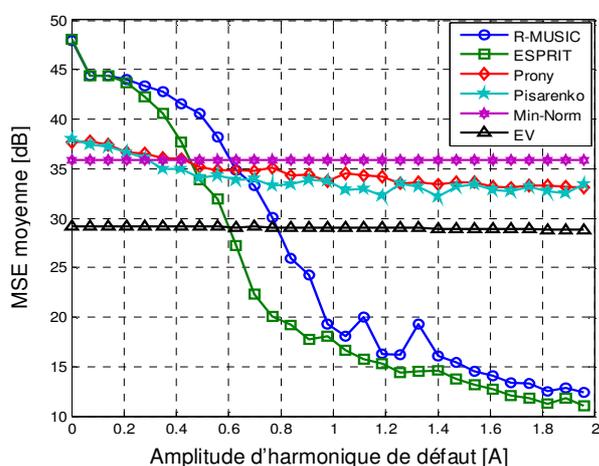


Figure VI.15 MSE moyenne de détection des barres rotoriques cassées pour un SNR=30dB

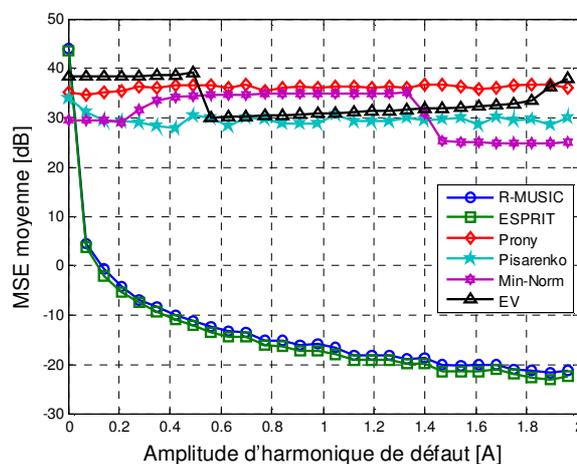


Figure VI.16 MSE moyenne de détection des roulements endommagés pour un SNR=30dB

Dans une vision globale, il est conclu que les méthodes ESPRIT et Root-MUSIC sont très puissantes dans la détection des fréquences de défauts malgré leurs faibles amplitudes. Alors que les techniques EV et MN présentent une grande instabilité dans cette identification vu les fluctuations qu'elles présentent pour les défauts ayant une faible amplitude. Leurs précisions restent limitées et ne convergent pas avec l'augmentation de l'amplitude des défaillances.

Cependant, les méthodes de Prony et Pisarenko ont un modeste degré de performance par rapport à celui des méthodes ESPRIT et Root-MUSIC. En effet, ESPRIT et Root-MUSIC sont deux méthodes compétitives. Elles ont une bonne capacité de détection et de résolution. Elle dépasse fortement celles des autres méthodes étudiées. Quant à la technique ESPRIT, elle permet une haute précision et une très bonne fiabilité dans la discrimination des harmoniques des défauts contenues dans un courant statorique. Cela justifie l'utilité de cette méthode dans l'analyse spectrale des signaux électriques produits par un générateur d'éolienne. Cela est vrai, malgré que cet algorithme présente un temps de calcul élevé. Il doit être minimisé.

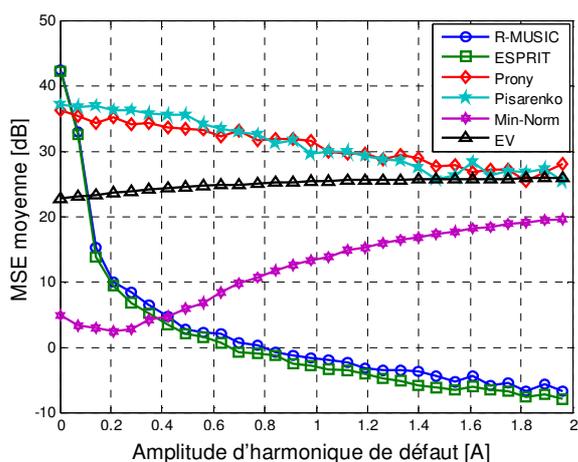


Figure VI.17 MSE moyenne de détection de désalignement pour un SNR=30dB

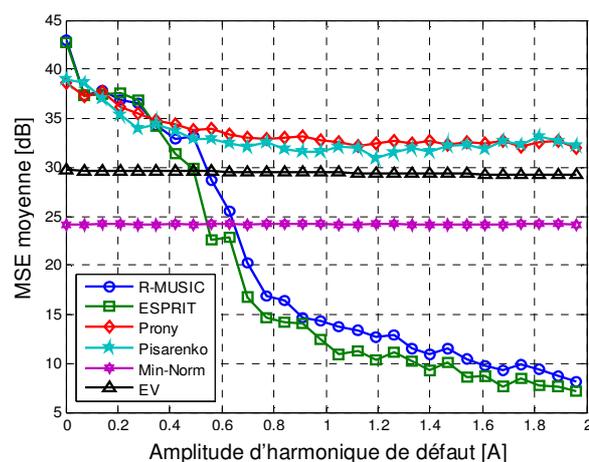


Figure VI.18 MSE moyenne de détection d'excentricité d'entrefer pour un SNR=30dB

Cependant, les méthodes de Prony et Pisarenko ne sont pas performantes en détection lorsque le bruit augmente. Elles ont une utilité pratique limitée. Tandis que les algorithmes EV et MN sont relativement des bons outils en précision de détection puisqu'elles présentent parfois une légère détérioration dans l'estimation fréquentielle des harmoniques des défauts notamment avec la diminution de SNR. Cela est dû à la non correspondance des vecteurs propres aux fréquences requises.

Ces algorithmes de traitement du signal ont été classés avec trois critères d'évaluation. Ils sont précédemment étudiés comme indiqué dans le tableau IV.4 [197].

Tableau IV.4 Classement des méthodes HRM étudiées selon leurs performances

Méthode	Temps de calcul	Précision	Risque	Rang
ESPRIT	moyen	très élevée	aucun	1
R-MUSIC	moyen	élevée	aucun	2
Min-Norm	court	moyen	moyen	3
EV	long	moyen	moyen	4
Pisarenko	court	faible	moyen	5
Prony	court	faible	moyen	6

La méthode ESPRIT-TLS offre une meilleure résolution spectrale. Son amélioration est une opération exigée pour la rendre applicable en temps réel dans le diagnostic de défauts d'éoliennes. Le chapitre suivant met l'accent sur cette procédure.

# Chapitre V

---

## Optimisation de la méthode ESPRIT-TLS

### I. Diagnostic de défauts par l'analyse spectrale

#### I.1 Nécessité de diagnostic

Les machines à induction électriques sont des dispositifs électromécaniques complexes. Ils sont souvent utilisés dans des applications de conversion de l'énergie électrique en une autre mécanique ou inversement. Ces machines sont utilisées en diverses conditions. Leurs applications peuvent être dans des endroits dangereux ou dans des environnements sévères.

Cependant, ces machines sont exposées à de nombreuses pannes dues à des défauts de structure ou de fonctionnement. Toute panne non identifiée à temps, peut devenir catastrophique. La machine peut donc subir des dommages graves. Ainsi, les défauts non détectés peuvent générer des arrêts coûteux, des pertes de temps ou de production, des augmentations des coûts de maintenance et de gaspillage en matières premières. Nombreux techniciens étaient préoccupés par le suivi d'état de fonctionnement de ces machines. La seule façon d'éviter leurs dysfonctionnements est de détecter à temps les défauts relatifs. A cause de cet ennui, la détection automatique des défaillances s'impose.

Dans la manipulation de plusieurs appareils de mesure, le rôle de l'opérateur humain a été remplacé par des processus automatique à base des capteurs. Ces microsystèmes fournissent des informations plus précises sur les variables physiques à contrôler. Ces dispositifs ne sont pas idéaux. Ils peuvent avoir des défauts de fonctionnement. Cela peut donc générer des fausses alarmes. Le potentiel des défauts dans les capteurs, peut devenir critique. Cela apparaît souvent dans le contrôle automatique des machines. Les dysfonctionnements dans ce cas, peuvent être dangereux, néfastes ou dévastateurs.

En effet, avec l'ordinateur, la surveillance automatique en temps réel des machines est devenue possible. L'introduction des processeurs du signal numérique DSP dans tout réseau câblé ou sans fil avec un logiciel simple, a permis la protection de ces machines. Elle a été efficacement mise en œuvre sans coût supplémentaire. L'intelligence de ces nouvelles machines a permis d'intégrer des informations provenant de diverses sources. Pour les réseaux, elles

permettaient même de localiser tout composant défectueux, y compris les capteurs responsables de fausses alarmes.

La rapidité de réaction à l'apparition d'un défaut est également un paramètre décisif et réaliste. Cela est nécessaire avant d'avoir des fonctionnements désastreux des machines. Cette procédure est la base de détection et de diagnostic. Elle permet d'identifier et de localiser toutes les anomalies survenues dans les systèmes en utilisant leurs entrées, sorties et leurs structures [32, 34, 38, 40, 64, 66]. Le rôle principal d'un tel diagnostic est de générer l'alerte des défaillances dangereuses, leur reconnaissance et la planification de la maintenance préventive. Ce qui permet d'anticiper les risques et de les éviter.

## I.2 Type de diagnostic

Les différentes techniques de diagnostic adoptées dans l'industrie ont été réalisées principalement à travers les stratégies suivantes [32, 34, 38, 40, 64, 66] :

- Diagnostic de défauts, fondé sur l'approche signal, est l'analyse des données sur un système donné. Elle permet de décider si son état est normal ou anormal;
- Diagnostic de défauts, basé sur un modèle de connaissances relatives à un système donné, est le traitement d'un modèle mathématique caractérisant le mode de fonctionnement ou l'état de ce système. Il est réalisé à l'aide des algorithmes d'intelligence artificielle comme illustré sur la figure V.1;

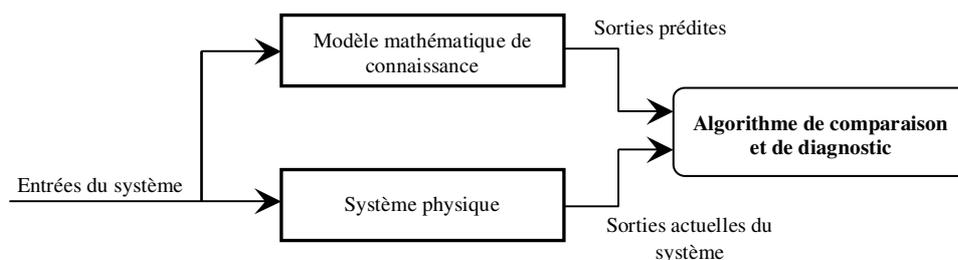


Figure V.1 Diagnostic par modèle de connaissance

L'implémentation pratique du diagnostic de défauts a été faite selon trois phases essentielles comme illustrées sur la figure V.2. L'approche de diagnostic de défauts par traitement du signal, consiste à surveiller une machine à induction. Cette procédure est réalisée à partir des sources d'informations données par différents capteurs. Ceux-ci peuvent être utilisées séparément ou traitées dans l'ensemble pour détecter et localiser des défaillances. En effet, tout signal mesuré, ayant des oscillations harmoniques ou des fluctuations de nature aléatoire, peut être lié à un défaut de la machine. Parmi les méthodes de traitement numérique du signal, occupant une grande place dans l'exploration de courant statorique, est la technique MCSA. Elle consiste à

indiquer tout défaut par sa signature spectrale qui le caractérise. Elle est facilement accessible. Elle a la capacité de détecter les défauts électromagnétiques et mécaniques. Plusieurs travaux de recherche ont été orientés dans ce sens [32-41].

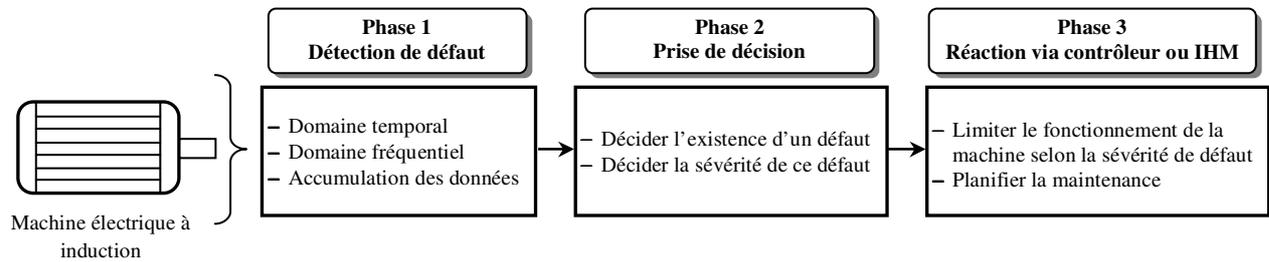


Figure V.2 Phases de diagnostic de défauts d'une machine à induction

### I.3 Concepts de base de diagnostic

Pour comprendre la théorie de diagnostic, il est nécessaire de définir ses propres concepts de base [32-41] :

- **Défaut** : qui est un état indésirable, reflétant un écart entre le comportement normal de référence d'un système physique et celui observé lors de son instrumentation. Ce défaut peut ne pas affecter le fonctionnement d'un tel système, mais il peut prédire sa défaillance future. La recherche des défauts est donc une tâche essentielle en diagnostic.
- **Défaillance** : définit l'excentricité fonctionnelle dans un système physique. Celui-ci sera dans ce cas, incapable d'achever ses fonctions ou ses services. Un défaut comprend une défaillance mais l'inverse n'est pas juste. Il existe plusieurs types de défaillances. Elles sont classées selon leurs causes, leurs conséquences, leur degré de gravité, leur apparition et leur évolution.
- **Panne** : est le résultat d'apparition d'une défaillance. Le système relatif cesse de faire correctement sa fonction.
- **Symptôme** : est une caractéristique indiquant l'état anormal de système relatif.
- **Perturbation** : est l'entrée non contrôlée d'un système physique. Elle a une influence gênante. Son effet est la variation inattendue des grandeurs physiques en sortie de système.

Les systèmes de diagnostic de défauts exécutent les trois principales tâches suivantes :

- 1) détection de défaut : c'est l'indication de quelque chose qui ne va pas dans le système surveillé ;
- 2) localisation de défaut : c'est la détermination de la position exacte de défaut (composant défectueux) ;
- 3) identification de défaut : c'est la détermination des causes et de la gravité de défaut ;

#### I.4 Algorithme de diagnostic par analyse spectrale

Les méthodes de diagnostic par analyse spectrale du signal s'appuient sur la propriété d'existence des paramètres fréquentielles relatives au fonctionnement normal ou défaillant de système surveillé. Cette approche exige dans un premier temps, la modélisation des signaux. Après, une transformation de ces derniers en domaine fréquentiel s'ensuit. Cette procédure est adéquate au diagnostic des machines électrique à induction. L'apparition des phénomènes anormaux s'interprètent par l'apparition des fréquences parasites (harmoniques ou raies) dans les spectres des grandeurs affectées par les défauts. Ces grandeurs sont soit électriques (souvent les courants statoriques de ligne) ou soit mécaniques (vibration, couple électromagnétique). La figure V.3 illustre l'organigramme général de diagnostic par analyse spectrale.

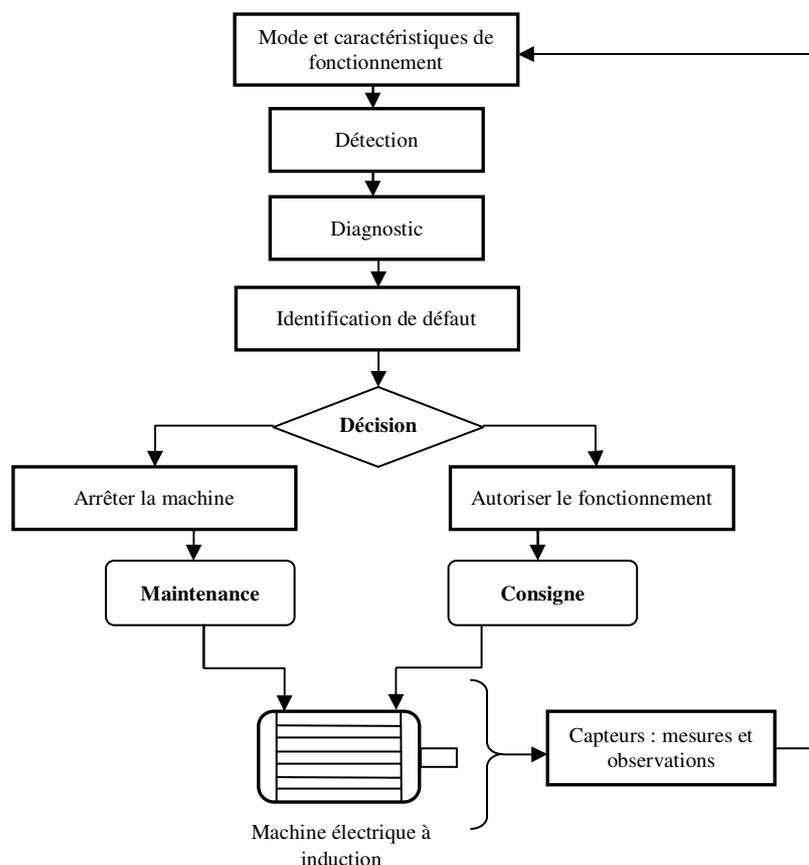


Figure V.3 Organigramme général de diagnostic par l'analyse spectrale

Cette technique nécessite une analyse d'un expert [32-41]. Grâce à son avantage, on a employé la méthode ESPRIT-TLS pour la détection spectrale des défauts.

## II. Limitations de la méthode ESPRIT-TLS

Pour détecter les défauts dans les machines électriques, des recherches récentes sont orientées vers la télésurveillance. Elles sont basées sur l'analyse spectrale du courant statorique CSA. Cette technique est très pratique et moins onéreuse. En outre, avec le développement technologique des processeurs avancés du signal numérique DSP, le diagnostic des pannes et des défaillances des pièces dans les machines électromécaniques peut maintenant être fait en temps réel [38, 40, 97]. Plusieurs approches appliquant des techniques avancées de traitement du signal ont été utilisées dans ce cas, tels que la FFT, la STFT, la DWT,... Cependant, ces méthodes restent limitées parce qu'elles présentent quelques inconvénients affectant leur robustesse. Ils sont résumés comme suit :

- Temps d'échantillonnage accru pour une bonne résolution de fréquence;
- Discrimination des fréquences limitée par la longueur de la fenêtre d'observation relativement à la durée du signal;
- Résolution fréquentielle dépendante de la résolution temporelle et inversement;

On a réalisé dans [197] une analyse comparative des performances des méthodes d'estimation fréquentielle à haute résolution HRM. Ces algorithmes sont basés sur l'analyse des valeurs et des vecteurs propres de la matrice d'auto-corrélation de courant statorique corrompu par un bruit.

Dans cette investigation, on a démontré que la méthode ESPRIT-TLS a une haute précision. Elle surpasse tous les autres algorithmes. C'est une méthode de haute résolution HRM. Elle est nommée méthode de sous-espaces. Elle est largement adoptée au diagnostic des machines électromécaniques. Elle est utilisée dans l'estimation fréquentielle [38, 56, 61, 65]. C'est un algorithme permettant une précision de détection spectrale très élevée et une haute résistance au bruit par rapport aux autres méthodes telles que MUSIC et Root-MUSIC.

Cependant, la méthode ESPRIT-TLS exige un temps de calcul important. Il apparaît dans l'estimation des fréquences, surtout avec une grande matrice d'auto-corrélation ou avec un grand nombre des données du signal acquis.

Une technique à rang réduit [85] a été proposée pour transformer l'algorithme de la méthode ESPRIT en algorithme simplifié à faible complexité. Toutefois, cette version présente une dégradation des performances. Elle apparaît notamment lors de diminution de rapport SNR ou

lors d'atténuation des harmoniques. Son application dans la détection des anomalies en temps réel, reste donc très limitée malgré sa haute précision. Une version améliorée de la méthode ESPRIT-TLS pour une détection et un diagnostic des défauts d'éoliennes plus rapides s'impose. Un perfectionnement est donc proposé. Il est basé sur une technique de filtrage passe-bande et sur une technique de décimation [214]. En effet, cela permet de nombreux avantages :

- Diminution de coût de complexité de la méthode ESPRIT-TLS et réduction de son temps d'exécution ;
- Économie d'espace mémoire et augmentation de la précision en bande de fréquences spécifiées, etc. ;

### III. Théorie de la méthode ESPRIT-TLS

Les méthodes à haute résolution HRM sont très utilisées en diagnostic des anomalies des machines à induction. Elles permettent de détecter et d'identifier tout élément défaillant de celles-ci. Cela est réalisé à l'aide de la fréquence et de l'amplitude de son signal statorique. D'après nos tests, la technique la plus exacte et la plus efficace est ESPRIT-TLS. Elle appartient à l'ensemble des méthodes paramétriques d'estimation spectrale à sous-espaces. Elle est basée sur la décomposition en vecteurs propres. Elle sépare donc l'espace d'observation en sous-espace du signal utile et en son complément orthogonal, dit sous-espace de bruit. Ainsi, l'invariance rotationnelle entre les deux sous-espaces permet l'extraction des composantes spectrales présentes dans le signal étudié [36, 70-75, 85, 86]. On va présenter en détail les fondements théoriques de la méthode ESPRIT-TLS pour qu'on puisse l'amender par la suite.

#### III.1 Estimation de la matrice d'auto-corrélation

En se basant sur le modèle du courant statorique défini par l'équation (IV.1) abordée au chapitre IV, la matrice d'auto-corrélation de ce signal peut alors être estimée comme suit [74] :

$$R_i = E[i(n).i^H(n)] = R_s + R_b = S.P.S^H + \sigma_b^2.I \quad (V.1)$$

Elle est composée d'une somme des matrices d'auto-corrélation de signal et du bruit. Le symbole  $H$  indique la transposée hermitienne.  $\sigma_b^2$  est la variance du bruit blanc.  $I$  est la matrice identité de taille  $(N_s \times N_s)$ . Par contre,  $P$  est la matrice de puissance des harmoniques définie par :

$$P = \text{diag}[I_1^2 \ I_2^2 \ \dots \ I_L^2] \quad (V.2)$$

$S$  est la matrice de Vandermonde définie par :

$$S = [s_1 \cdots s_i \cdots s_L] \quad (\text{V.3})$$

$$S_k = \left[ 1 \ e^{j\left(2\pi\frac{f_k}{F_s}\right)} \ e^{j\left(4\pi\frac{f_k}{F_s}\right)} \ \cdots \ e^{j\left(2\pi(N_s-1)\frac{f_k}{F_s}\right)} \right]^T \quad (\text{V.4})$$

La taille finie des données du signal rend le calcul de la matrice d'auto-corrélation  $R_i$  imprécis. C'est une matrice inconnue au début. Elle doit être singulière. Pour toute détection efficace, il est nécessaire de réduire par moyennage, les fluctuations statistiques présentes dans l'estimation de cette matrice d'auto-corrélation [43], [74]. En outre, la précision de ESPRIT-TLS dépend de la dimension ( $M \leq N_s$ ) de  $R_i$ . Il est possible de la calculer [43-46], [74] à partir des échantillons de données acquis par la relation suivante :

$$\hat{R}_i = \frac{1}{N_s - M + 1} D D^H \quad (\text{V.5})$$

Où  $M$  et  $D$  sont respectivement l'ordre de la matrice des données et la matrice de Hankel définie par (voir Annexe II) :

$$D = \begin{bmatrix} i(0) & \cdots & i(N_s - M) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ i(M-1) & \cdots & i(N_s - 1) \end{bmatrix} \quad (\text{V.6})$$

La dimension de  $R_i$  doit être suffisamment élevée pour avoir plus de valeurs propres pour le sous-espace de bruit. Elle doit être aussi suffisamment faible pour minimiser le temps de calcul. Lorsque la valeur de  $M$  devient en dessous de  $N_s/3$ , on observe une augmentation de l'erreur de détection fréquentielle. Au contraire, si  $M$  augmente au-delà de  $N_s/2$ , le temps de calcul augmente. Il y a donc un compromis à prendre en considération pour un bon choix de  $M$ . La valeur de  $M$  est choisie empiriquement. Elle est bornée comme montré dans l'encadrement (V.7) afin d'assurer une bonne performance d'estimation:

$$\frac{N_s}{3} < M < \frac{N_s}{2} \quad (\text{V.7})$$

Dans ce travail, la dimension  $M$  de la matrice d'auto-corrélation est prise arrondie comme suit:

$$\hat{M} = \text{Round}\left(\frac{N_s - 1}{2}\right) \quad (\text{V.8})$$

Le nombre  $L$  de fréquences n'est pas connu a priori. C'est la dimension fréquentielle du signal FSDO (Frequency Signal Dimension Order).  $L$  doit être estimé par la minimisation de la fonction coût  $MDL(k)$ . Elle est nommée longueur minimale de description (Minimum Description

Length). Afin d'obtenir une estimation robuste, le critère  $MDL$  est utilisé comme exprimé [44, 48, 217, 220] dans la formule suivante pour tout  $k = 1, 2, \dots, L$  :

$$MDL(k) = -\log \left( \frac{\prod_{i=k+1}^L \lambda_i^{\frac{1}{L-k}}}{\frac{1}{L-k} \sum_{i=k+1}^L \lambda_i} \right)^{\rho(L-k)} + \frac{1}{2} k (2L-k) \log(\rho) \quad (V.9)$$

$$\rho = N_s - L - 2 \quad (V.10)$$

Les  $\lambda_i$  sont les valeurs propres de la matrice d'auto-corrélation  $R_i$ . L'estimation de  $L$  peut alors être analytiquement exprimée sous la forme :

$$\hat{L} = \arg_k \min (MDL(k)) \quad (V.11)$$

Cependant, les performances ESPRIT-TLS deviennent complètement dégradées en choisissant une valeur fautive de FSDO.

### III.2 Décomposition propre de la matrice d'auto-corrélation

La décomposition propre de la matrice d'auto-corrélation  $R_i$  est donnée par l'exploitation des valeurs propres  $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_M\}$  et leurs vecteurs propres correspondants  $\{v_1, v_2, \dots, v_M\}$  [44] :

$$R_i = \sum_{k=1}^{N_s} \lambda_k v_k v_k^H = \underbrace{U_s \cdot E_s \cdot U_s^H}_{R_s} + \underbrace{U_b \cdot E_b \cdot U_b^H}_{R_b} \quad (V.12)$$

Où:

$$U_s = [v_1 \cdots v_L], E_s = \text{diag} [\lambda_1 \cdots \lambda_L] \quad (V.13)$$

$$U_b = [v_{L+1} \cdots v_{N_s}], E_b = \sigma_b^2 I_{N_s-L} \quad (V.14)$$

$U_s$  représente la matrice des vecteurs propres de sous-espace signal. Ils sont relatifs aux  $L$  valeurs propres arrangées en ordre décroissant. Tandis que  $U_b$  représente la matrice des vecteurs propres de sous-espace bruit relatives aux  $N_s-L$  vecteurs propres. Ils ont des valeurs propres égales à la variance  $\sigma_b^2$  de bruit. Les matrices diagonales  $E_s$  et  $E_b$  contiennent les valeurs propres  $\lambda_i$  correspondantes aux vecteurs propres  $v_i$ .

### III.3 Estimation fréquentielle

La méthode ESPRIT-TLS est basée sur l'étude de sous-espace signal  $E_s$ . Elle utilise certaines propriétés d'invariance rotationnelle fondée sur le cas d'exponentielle. Une décomposition de la matrice  $S$  en deux matrices  $S_1$  et  $S_2$  est considérée comme suit :

$$S = \left[ \begin{array}{cccc} 1 & 1 & \dots & 1 \\ e^{j\left(2\pi\frac{f_1}{F_s}\right)} & e^{j\left(2\pi\frac{f_2}{F_s}\right)} & \dots & e^{j\left(2\pi\frac{f_L}{F_s}\right)} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ e^{j\left(2\pi(N_s-1)\frac{f_1}{F_s}\right)} & e^{j\left(2\pi(N_s-1)\frac{f_2}{F_s}\right)} & \dots & e^{j\left(2\pi(N_s-1)\frac{f_L}{F_s}\right)} \end{array} \right] \left. \vphantom{\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array}} \right\} S_1 \left. \vphantom{\begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array}} \right\} S_2 \quad (\text{V.15})$$

$S_1$  représente les premières  $(N_s-1)$  lignes de la matrice  $S$

$S_2$  représente les dernières  $(N_s-1)$  lignes de la matrice  $S$

L'invariance rotationnelle entre les deux sous-espaces conduit à l'équation suivante :

$$S_1 = \Phi S_2 \quad (\text{V.16})$$

La matrice  $\Phi$  contient toutes les informations sur les  $L$  composantes fréquentielles. Pour éviter les erreurs, l'algorithme ESPRIT-TLS (Somme des moindres carrés) permet de trouver la matrice  $\Phi$  par minimisation [74].

$$\Phi = \begin{bmatrix} e^{j\left(2\pi\frac{f_1}{F_s}\right)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j\left(2\pi\frac{f_2}{F_s}\right)} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{j\left(2\pi\frac{f_L}{F_s}\right)} \end{bmatrix} \quad (\text{V.17})$$

La détermination de cette matrice peut conduire à obtenir les estimations de la fréquence définie par la formule suivante :

$$f_k = \frac{\text{Arg}(\Phi_{k,k})}{2\pi} F_s, \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (\text{V.18})$$

### III.4 Estimation des puissances des harmoniques

Au début, les composantes fréquentielles recherchées dans le signal sont estimées par la méthode ESPRIT-TLS. Les valeurs de leurs amplitudes et de leurs puissances sont ensuite calculées. En utilisant la décomposition propre de sous-espace signal [74, 44], on trouve :

$$R_s = S.P.S^H = \sum_{k=1}^L (\lambda_k + \sigma_b^2) \cdot v_k \cdot v_k^H \quad (\text{V.19})$$

On suppose que les vecteurs propres de sous-espace signal sont normalisés comme suit :

$$v_k^H \cdot v_k = 1 \quad (\text{V.20})$$

Ainsi, pour  $k=1, 2, \dots, L$  :

$$R_i \cdot v_k = \lambda_k \cdot v_k \quad (\text{V.21})$$

En multipliant les deux côtés de cette équation par  $v_k^H$ , on a :

$$v_k^H \cdot R_i \cdot v_k = \lambda_k \cdot v_k^H \cdot v_k \quad (\text{V.22})$$

D'après les équations (V.1), (V.11) et (V.18), on trouve :

$$v_k^H \cdot R_i \cdot v_k = v_k^H \cdot \left[ \sum_{k=1}^L P_k s_k s_k^H + \sigma_b^2 \cdot I \right] \cdot v_k = \lambda_k \quad (\text{V.23})$$

Cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$\sum_{k=1}^L P_k \cdot |s_k^H \cdot v_k|^2 = \lambda_k - \sigma_b^2 \quad (\text{V.24})$$

Avec :

$$|s_k^H \cdot v_k|^2 = |Q_k (e^{j2\pi f_k})|^2 \quad (\text{V.25})$$

L'équation (V.18) peut être écrite comme suit :

$$\sum_{k=1}^L P_k \cdot |Q_k (e^{j2\pi f_k})|^2 = \lambda_k - \sigma_b^2 \quad (\text{V.26})$$

Cette formulation est un ensemble de  $L$  équations linéaires avec un nombre  $L$  de puissances d'harmoniques inconnues. Il est très facile d'extraire le vecteur  $P$  des puissances des harmoniques à partir de l'équation (V.21).

#### IV. Amélioration des performances de la méthode ESPRIT-TLS

La discrimination des composantes fréquentielles de petites amplitudes autour de la fréquence fondamentale  $f_0$  par la méthode ESPRIT-TLS est difficile. Cela est essentiellement dû au temps du calcul nécessaire à l'exécution de cet algorithme pour trouver les composantes fréquentielles correspondantes. En effet, le coût de calcul de la méthode ESPRIT-TLS augmente avec la taille de la matrice d'auto-corrélation et avec le nombre des échantillons du signal acquis. Sa complexité est multipliée par  $N_s^3$ . Cela constitue un inconvénient majeur. Il peut causer une évolution catastrophique de défaillance de toute machine éolienne. Il peut conduire à des dommages graves. Pour appliquer en temps réel, la télésurveillance d'état de santé d'éolienne, une version améliorée de l'algorithme ESPRIT-TLS intitulée Fast-ESPRIT a été proposée et utilisée. Cet algorithme amélioré est basé sur le filtrage passe-bande à réponse impulsionnelle infinie IIR (Infinite Impulse Response) et sur une technique de décimation de toute bande

fréquentielle  $[f_l, f_h]$  de défaut à détecter. Les bornes  $f_l$  et  $f_h$  de cette bande sont les fréquences de coupure basse et haute du filtre passe-bande utilisé. Le choix de ce type de filtre IIR est justifié par le fait qu'il offre de meilleures performances avec un ordre inférieur et avec des très faibles coefficients en plus de son implémentation simple et facile. Ce processus permet une réduction remarquable du temps de calcul et de la taille mémoire occupée par les données traitées. Le facteur de décimation utilisé est calculé en respectant les critères de Nyquist [215] de la façon suivante :

$$\Gamma = \begin{cases} \frac{F_{Nyquist}}{2f_0} = \frac{F_s}{4f_0} & \text{si } f_h < 95 \text{ Hz} \\ \frac{F_{Nyquist}}{6f_0} = \frac{F_s}{12f_0} & \text{si } 95 \text{ Hz} \leq f_h < 500 \text{ Hz} \end{cases} \quad (\text{V.27})$$

La figure V.4 montre le schéma fonctionnel des différentes étapes de l'algorithme Fast-ESPRIT. Avec leur exécution, on identifie les harmoniques distinguant les défauts et leurs puissances facilement.

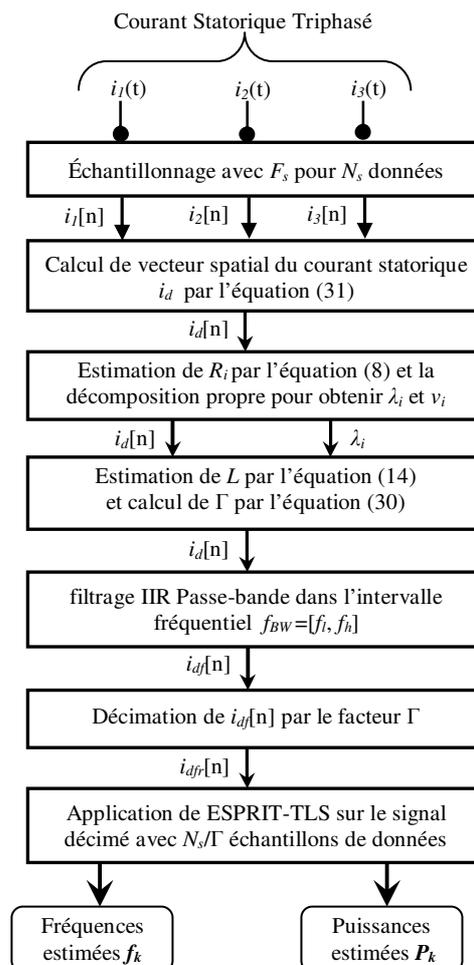


Figure V.4 Schéma fonctionnel de l'algorithme Fast-ESPRIT

La figure V.5 montre la variation du facteur  $\Gamma$  selon  $f_h$ . Ce facteur de décimation diminue avec l'augmentation de la fréquence maximale des harmoniques détectées dans le signal.

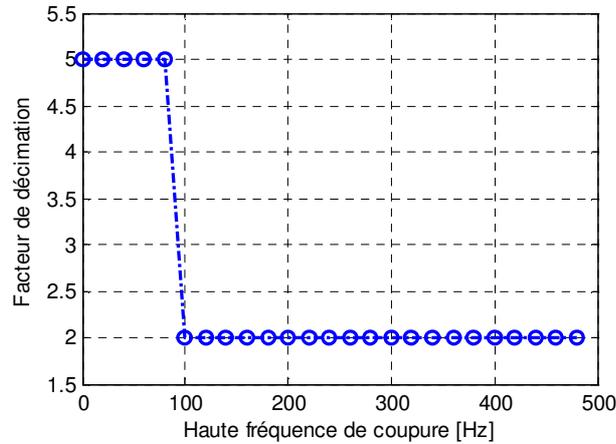


Figure V.5 Evolution du facteur de décimation avec la fréquence de défaut

Dans un premier temps, les valeurs acquises  $i_{1,2,3}[n]$  du courant statorique triphasé échantillonné à la fréquence  $F_s$  sont utilisées pour calculer le vecteur spatial du courant statorique [217] comme suit :

$$i_d = \frac{i_1 + a.i_2 + a^2.i_3}{3}, \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (\text{V.28})$$

Où  $a$ , est un opérateur spatial. Ce vecteur permet la détection et le diagnostic des défauts dans toutes les phases du courant statorique au lieu de se limiter à examiner leur signature dans ces phases. Avec cette nouvelle méthode, le temps du calcul est minimisé. Dans sa deuxième étape, une estimation de la matrice d'auto-corrélation  $R_i$  est réalisée. Les valeurs propres  $\lambda_i$  sont ensuite extraites. Elles permettent d'estimer le nombre  $L$  d'harmoniques à rechercher dans le courant statorique en appliquant le critère  $MDL$  vu dans les relations (V.9) et (V.10). Ensuite, la séquence de signal  $i_d[n]$  est soumise à l'action d'un filtre récursif passe-bande à réponse impulsionnelle infinie (IIR). Ce filtre numérique est basé sur un ajustement des moindres carrés dans la gamme de fréquences  $[f_l, f_h]$  caractérisant les défauts recherchés. Il a une réponse plate dans la bande passante souhaitée. Son utilisation est justifiée par son efficacité dans l'extraction des informations nécessaires à la reconnaissance des défauts.

Dans la troisième étape de cet algorithme, la séquence  $i_{df}[n]$  du vecteur spatial relatif au courant statorique, est décimée par un facteur  $\Gamma$  comme exprimé dans (V.26). La technique de décimation appliquée est basée sur utilisation d'un filtre passe-bas assurant l'anti-aliasing ou l'anti-crénelage (anti-escalier). Ce filtre élimine les parties du signal ne contenant aucune information pertinente. Cela permet de minimiser les effets de distorsion afin de garantir une

haute résolution fréquentielle. L'avantage qu'offre cette décimation mise en œuvre, est la réduction du coût de traitement et de la taille mémoire nécessaire pour une implémentation bon marché. Enfin, l'algorithme ESPRIT-TLS est appliqué sur la séquence du signal décimé de  $N_s/\Gamma$  échantillons de données. Cette application est dans le but d'identifier toutes les composantes fréquentielles et leurs puissances contenues dans le signal du courant statorique triphasé.

## **V. Simulation, analyse des résultats et champs d'application**

L'apparition d'un défaut dans un système éolien conduit à son dysfonctionnement. Il l'oblige à se déconnecter de réseau, et d'attendre une opération de maintenance. De plus, si ce défaut n'est pas détecté et compensé rapidement, il peut entraîner la destruction des convertisseurs et d'autres dégâts. Pour éviter cela, l'application de la méthode proposée Fast-ESPRIT en surveillance temps réel d'un tel système éolien sera efficace. Cette solution présente des qualités en rapidité de calcul et en précision. L'approche ainsi exposée a été appliquée et simulée sous différents scénarios et sous divers types de défaillances d'éoliennes. Elles sont détaillées dans le tableau IV.1 de la section II du chapitre IV.

Pour évaluer sa performance dans la détection d'anomalies en temps réel, l'algorithme Fast-ESPRIT a été intégré avec un contrôleur de diagnostic de pannes qui collabore avec des capteurs de vibrations localisés dans des pièces mécaniques spécifiques d'éolienne pour surveiller leurs niveaux de vibration au sein de la machine.

Le contrôleur décide d'abord l'existence d'un défaut ou non en fonction de deux paramètres : la mesure des vibrations recueillies par ces capteurs et les fréquences des harmoniques avec leurs puissances estimées par la méthode Fast-ESPRIT. Puis, ce contrôleur classe et localise les défaillances ainsi détectées selon leurs types. Cela permet au personnel de maintenance d'intervenir pour réparer le composant défaillant concerné facilement et au temps exact. La figure V.6 illustre la technique expliquée.

En effet, l'algorithme de diagnostic appliqué est basé sur la commutation de la bande fréquentielle caractérisant tout défaut. Cet algorithme balaie chaque bande séparément. Il recherche les défauts susceptibles de se produire. Dans leur détection, ces défauts sont classés selon leur type et en fonction de leurs fréquences. Ainsi, leur diagnostic se fait relativement aux intervalles spectraux encadrant la signature de défaut [32, 202-206].

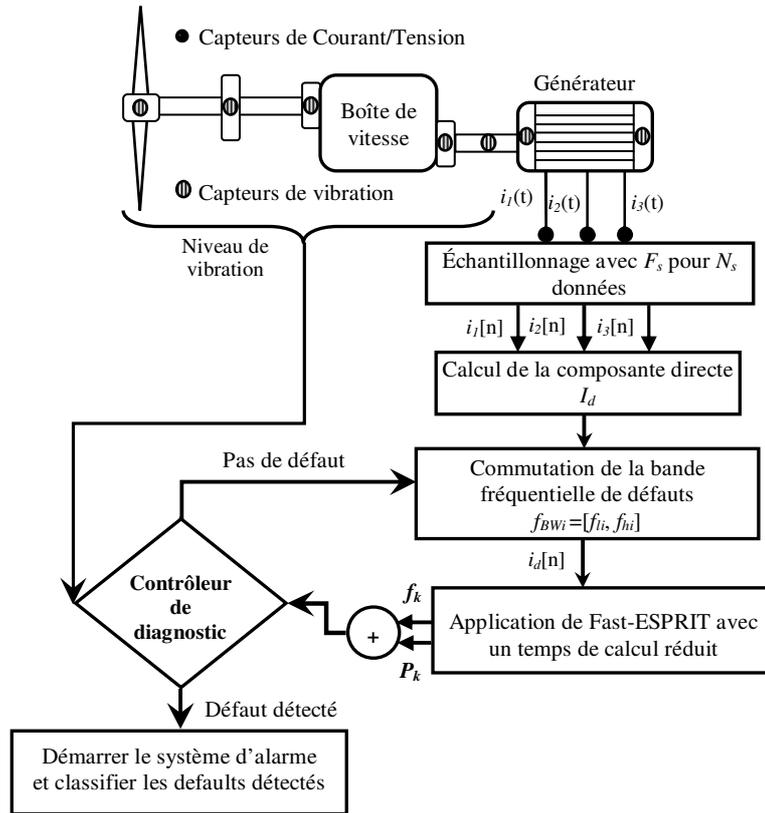


Figure V.6 Diagnostic intelligent des anomalies d'éolienne à l'aide l'algorithme Fast-ESPRIT

Cela signifie que la méthode Fast-ESPRIT n'est pas appliquée à la totalité du signal. Elle permet d'inspecter seulement la partie contenant les informations désirées. Elles sont extraites pour les analyser ultérieurement. Lors de détection d'un défaut, un système d'alarme est déclenché pour alerter le personnel de surveillance et d'entretien d'urgence. Cette procédure offre de nombreux avantages, car elle permet une identification efficace et une classification précise des défauts avec une implémentation économique en temps réel [34, 38, 40].

Des simulations sur ordinateur sont réalisées à l'aide de logiciel Matlab [192]. Un générateur d'éolienne présentant des anomalies électromécaniques, ayant deux pôles pairs et les valeurs nominales suivantes 4kW/50Hz, 230/400V est utilisé. Le courant statorique issu du générateur d'éolienne est simulé selon un modèle décrit dans l'équation (IV.1) de la partie III en chapitre IV. Les paramètres de simulation sont résumés dans le tableau V.1. Pour simplifier la simulation, une seule phase du courant statorique triphasé a été étudiée. La puissance  $P_k$  de chaque défaut détecté, est calculée sur la base d'amplitude de son harmonique :

$$P_k = 10 \log_{10} \left( \frac{I_k}{2} \right) \quad (\text{V.29})$$

Tableau V.1 Paramètres de simulation

Paramètre	Valeur
$S$	0,033
$P$	2
$f_0$	50 Hz
$f_r$	29,01 Hz
$n_b$	12
$N_s$	1024
$F_s$	1000 Hz
Amplitude du courant statorique	10 A
Processeur de calcul	Intel Core2 Duo T6570 2,1 GHz

Avant de l'examiner, le signal du courant statorique doit être filtré. Cela permet d'obtenir en sortie un signal composite ayant un bruit négligeable par rapport à la fondamentale et à ses harmoniques.

### V.1 Détection d'excentricité d'entrefer

Dans le but de comparer les performances de la méthode originale ESPRIT-TLS avec celle proposée Fast-ESPRIT, on présente les résultats de simulation sur le tableau V.2. Ils permettent d'identifier la signature spectrale de défaut d'excentricité d'entrefer, dans une éolienne ayant les caractéristiques techniques décrites précédemment.

Tableau V.2 Comparaison de performance de calcul

Méthode	Échantillons de données	Harmoniques $f_k/P_k$	Taille mémoire du signal (Ko)	M	Temps écoulé (s)
<b>ESPRIT-TLS Originale</b>	1024	50.00Hz/ 16.99dB 25.82 Hz/ -10.97dB 74.17Hz/ -13.47dB	16	511	4.3471
<b>Fast-ESPRIT</b>	205	49.99Hz/ 16.96dB 25.81Hz/ -12.10dB 74.17Hz/ -14.12dB	3.2	102	0.03046

Les harmoniques caractérisant ce défaut sont présentés sur le tableau V.3. Cette expérience a été effectuée avec un niveau élevé du rapport signal sur bruit (SNR=80dB). Cela permet de déterminer le temps de calcul et la taille mémoire nécessaires aux deux algorithmes.

Tableau V.3 Paramètres de défaut d'excentricité d'entrefer

$f_{ecc}$ (Hz)	$I_{ecc}$ (A)	$P_{ecc}$ (dB)	$N_h$	SNR (dB)
25.825	0.4	-10.97	3	80
74.175	0.3	-13.46		

Selon le tableau V.2, les deux algorithmes ESPRIT-TLS originale et Fast-ESPRIT offrent une précision satisfaisante. Elles ont permis d'identifier convenablement la fréquence fondamentale  $f_0$  et les harmoniques  $f_{ecc}$  distinguant le défaut ( $N_h=L=3$ ) et ayant des petites amplitudes. Une faible différence en performance d'estimation de la puissance et de la fréquence est observée pour l'algorithme Fast-ESPRIT entre les valeurs de référence et celles estimées par cette

méthode. Cette négligeable perte est justifiée par les atténuations provoquées par le filtre IIR passe-bande utilisé. Les résultats obtenus confirment aussi la réduction importante en temps du calcul 142,7 fois inférieur. La taille mémoire nécessaire au traitement a connu également une diminution remarquable 5 fois moins. La complexité de cet algorithme a été en effet, modifiée de  $N_s^3$  à  $(N_s/\Gamma)^3$ .

La figure V.7 illustre l'estimation de la dimension de sous-espace signal à l'aide du critère de *Rissanen*. Ce dernier est basé sur la minimisation de la fonction coût *MDL* exprimé en (V.9) et (V.10). On remarque que l'estimateur *MDL* est conforme, mais ses performances se dégradent pour un signal bruité ayant un faible rapport SNR [44, 216, 217].

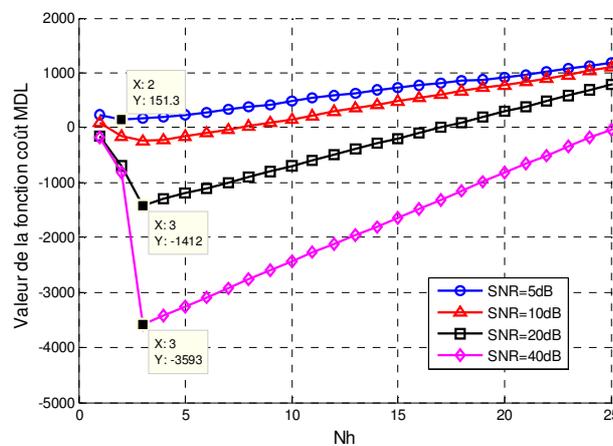


Figure V.7 Estimation du nombre de fréquences du signal par le critère *MDL* selon SNR

Dans la plupart des applications pratiques, le processus de décision sur l'ordre d'un modèle de système tient compte de la précision du modèle, des ressources de calcul, de la complexité du modèle et de la modélisation des caractéristiques des effets du bruit.

La figure V.8 montre le gain de la réponse fréquentielle du filtre IIR passe-bande de Yule-Walker, utilisé dans l'algorithme Fast-ESPRIT.

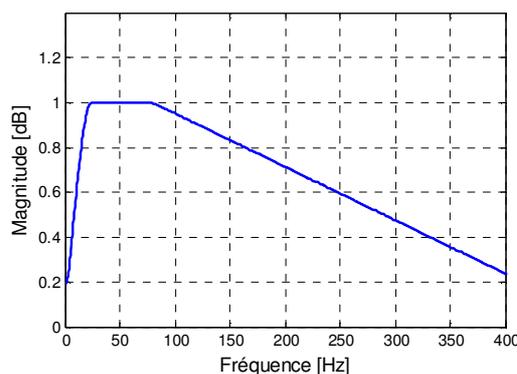


Figure V.8 Gain fréquentiel du filtre IIR passe-bande de Yule-Walker

Ce filtre a un ordre  $h=25$ . De toute évidence, on remarque que ce filtre présente une réponse plate dans la bande passante cible.

Sur la figure V.9, on illustre graphiquement les estimations de puissance et de fréquence données par la méthode proposée. Il apparaît évident que la technique Fast-ESPRIT a détecté avec une haute précision toutes les fréquences existantes dans le signal composite de simulation. Elle a identifié aussi toutes ses harmoniques existantes dans la bande fréquentielle [20,80]Hz caractérisant tout défaut d'excentricité d'entrefer.

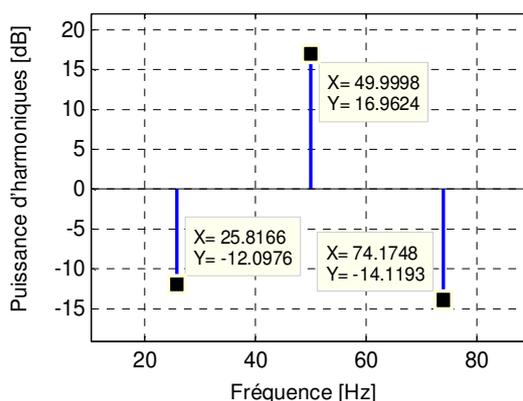


Figure V.9 Détection de défaut d'excentricité d'entrefer par Fast-ESPRIT

## V.2 Détection de barres rotoriques cassées

Cette fois ci, la méthode Fast-ESPRIT proposée, a été appliquée au courant statorique du générateur d'éolienne. Cette application a été effectuée pour détecter dans l'intervalle de fréquences [15, 80]Hz, la signature spectrale de la cassure des barres rotoriques. Les caractéristiques de ce défaut sont présentées dans le tableau V.4. Les résultats obtenus sont moyennés autour de cinquante réalisations.

Tableau V.4 Paramètres de défaut barres rotoriques cassées

$f_{brb}$ (Hz)	$I_{brb}$ (A)	$P_{brb}$ (dB)	$N_h$	SNR (dB)
22.525	0.3	-13.47	5	20
25.825	0.45	-9.95		
70.875	0.35	-12.13		
74.175	0.4	-10.97		

A partir de la figure V.10, on observe que la méthode Fast-ESPRIT nécessite un temps de calcul important. Elle a un taux d'erreur d'estimation plus élevé en détermination des harmoniques de défaut et de leurs puissances pour des valeurs de  $SNR \leq 15$ dB. Cela peut être interprété par les retards effectués en recherche des valeurs et vecteurs propres de la matrice d'auto-corrélation.

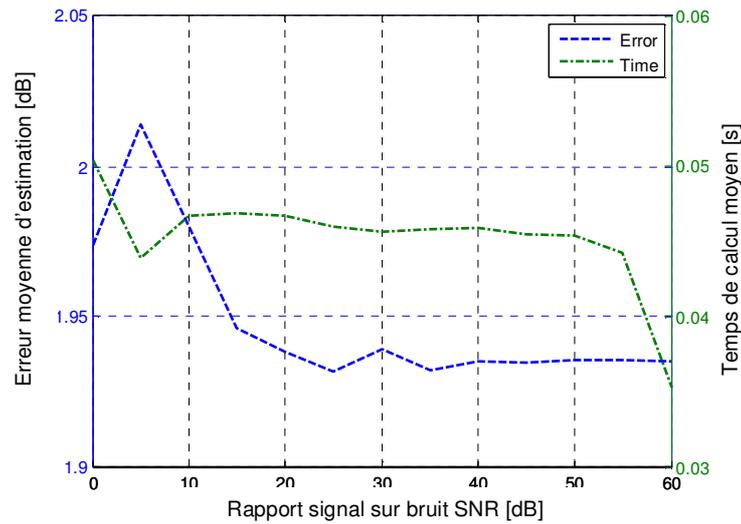


Figure V.10 Evolution de l'erreur moyenne d'estimation et de temps de calcul selon SNR

Au contraire, le temps de calcul en question diminue progressivement pour un signal légèrement bruité ayant un rapport SNR > 15dB. L'erreur d'estimation moyenne diminue jusqu'à sa valeur minimale du fait que SNR > 55dB.

On déduit de cette simulation que la méthode proposée a des difficultés en identification des défauts dans un environnement très bruyant. Par ailleurs, la figure V.11 montre que pour un signal de courant statorique ayant un rapport SNR < 10dB, la détection des puissances et des harmoniques de défaut présente des erreurs et une fluctuation remarquable.

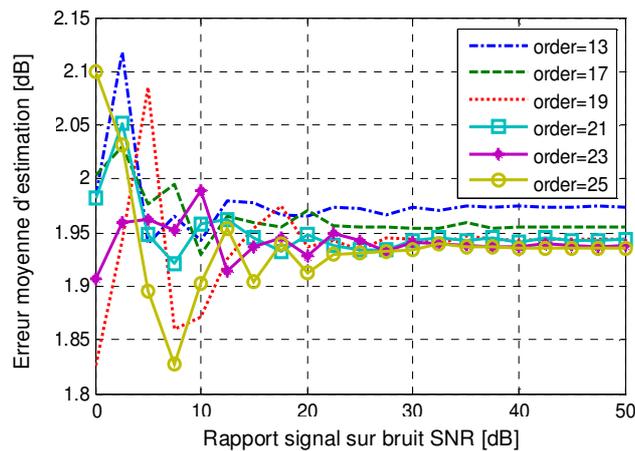


Figure V.11 Variation d'erreur moyenne d'estimation selon l'ordre du filtre IIR et le SNR

Ce taux d'erreur diminue lorsque l'ordre du filtre IIR passe-bande de Yule-Walker augmente. Cependant, la performance d'identification s'améliore et atteint un degré acceptable lorsque le rapport signal sur bruit SNR dépasse les 10dB. Dans ce cas, le taux d'erreur d'estimation se stabilise progressivement pour atteindre une valeur asymptotique.

Bien que l'écart type de l'erreur moyenne d'estimation soit faible en augmentant l'ordre du filtre IIR passe-bande de Yule-Walker, la précision de la méthode s'améliore proportionnellement.

En analysant la figure V.12, la discrimination des harmoniques de défaut ayant de faibles amplitudes est difficile. Parce que l'erreur moyenne d'estimation de puissances atteint sa valeur maximale lorsque le SNR diminue. Ainsi, pour avoir des résultats satisfaisants en termes de reconnaissance correcte de défaut, il est nécessaire d'ajuster le rapport SNR à une valeur supérieure à 15dB. Par contre, lorsque l'amplitude de défaut augmente, l'algorithme devient capable d'identifier les harmoniques avec plus de précision.

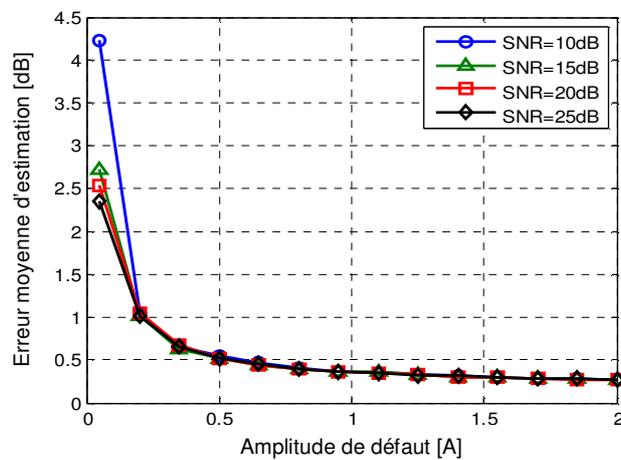


Figure V.12 Variation d'erreur moyenne d'estimation selon l'amplitude de défaut et le SNR

La figure V.13 présente le résultat de détection des harmoniques générées par le défaut de la cassure des barres rotoriques. Elle est effectuée par la méthode proposée Fast-ESPRIT.

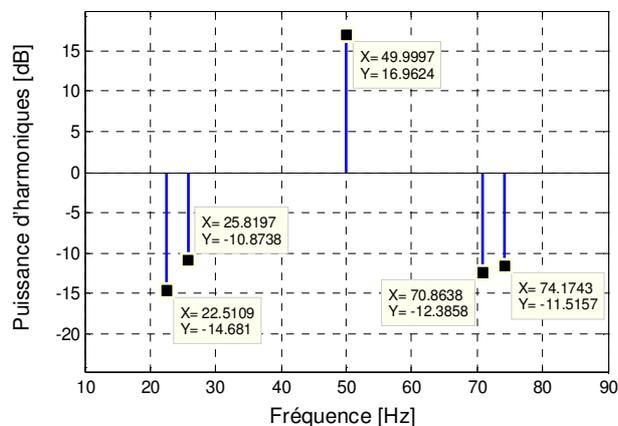


Figure V.13 Détection de défaut de barres rotoriques cassées par Fast-ESPRIT

Il est remarqué que l'algorithme Fast-ESPRIT est capable de séparer et de distinguer les composantes spectrales très proches et ayant des amplitudes plus faibles. Il le fait avec une haute précision de résolution et dans un temps de calcul optimal de 0,03021 seconde.

### V.3 Détection de roulements endommagés

Dans le troisième test, l'algorithme Fast-ESPRIT proposé, a été évalué en détection de signature spectrale des roulements endommagés dans la plage de fréquences [40, 200Hz]. Sur le tableau V.5, on donne les paramètres de défaut simulé.

Tableau V.5 Paramètres de défaut roulements endommagés

$f_{bng}$ (Hz)	$I_{bng}$ (A)	$P_{bng}$ (dB)	$N_h$	SNR (dB)
89.248	0.2	-16.99	3	20
155.248	0.25	-15.05		

Sur la figure V.14, on montre que l'approche proposée permet de donner un résultat satisfaisant avec une bonne précision et un temps minimal de calcul. Il a atteint 0,07093 secondes, même si la plage de recherche est large. Il est remarqué que ce temps de calcul est le double de celui nécessaire à la détection des défauts précédents. Lorsque l'intervalle fréquentiel de recherche des défaillances s'allonge, l'algorithme Fast-ESPRIT consomme beaucoup plus de temps pour trouver les harmoniques relatives à un défaut donné.

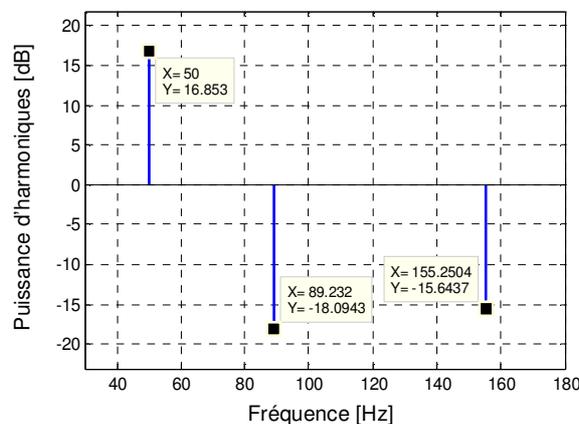


Figure V.14 Détection de défaut de roulements endommagés par Fast-ESPRIT

### V.4 Détection de désalignement

Dans cette simulation, la méthode Fast-ESPRIT a été évaluée pour identifier un nombre important d'harmoniques qui caractérisent la signature spectrale de défaut de désalignement dans la bande fréquentielle [10, 210Hz]. Les paramètres de ce défaut sont montrés sur le tableau V.6.

Tableau V.6 Paramètres de défaut désalignement

$f_{\text{mis}}$ (Hz)	$I_{\text{mis}}$ (A)	$P_{\text{mis}}$ (dB)	$N_h$	SNR (dB)
21	0.22	-16.16	7	20
37.03	0.33	-12.64		
79	0.27	-14.38		
95.05	0.37	-11.65		
137.03	0.18	-17.90		
195.05	0.15	-19.49		

En se référant à la figure V.15, la méthode appliquée offre une bonne capacité d'estimation spectrale. Elle a un bon coût de calcul qui égale à 0,07178 secondes.

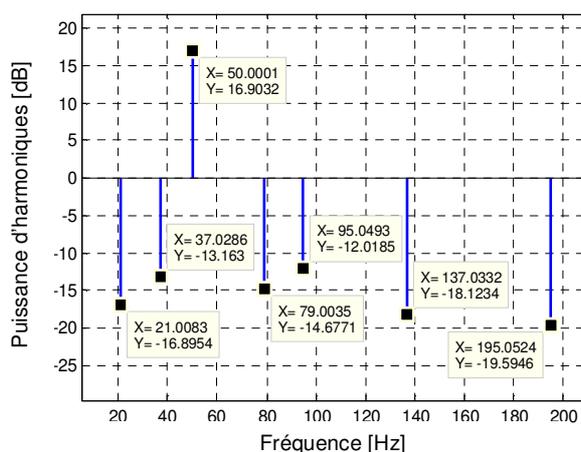


Figure V.15 Détection de défaut de désalignement par Fast-ESPRIT

Comme illustré sur la figure V.16, lorsque la largeur de la bande fréquentielle  $[f_l, f_h]$  qui contient les harmoniques d'un défaut et qui possède une borne supérieure  $f_h$  croissante et proche de la valeur de Nyquist  $F_{Nyquist}/2 = F_s/4$ , le facteur de décimation  $\Gamma$  diminue. Par conséquent, le nombre des échantillons du signal augmente. Cela provoque l'augmentation de dimension de la matrice d'auto-corrélation et conduit à l'élévation du temps de calcul.

Dans l'autre côté, si on a ( $f_h < F_{Nyquist}/2$ ) le temps de calcul consommé par l'algorithme Fast-ESPRIT devient minimal. Il reste presque sans changement malgré l'augmentation du nombre d'harmoniques de défaut contenues dans le signal du courant statorique. Cette augmentation influence légèrement le temps de calcul, estimé comme suit:

$$T_c = \Delta t \frac{N_s}{\Gamma} \quad (\text{V.30})$$

Où  $\Delta t$  est le temps nécessaire pour traiter un seul échantillon du signal.

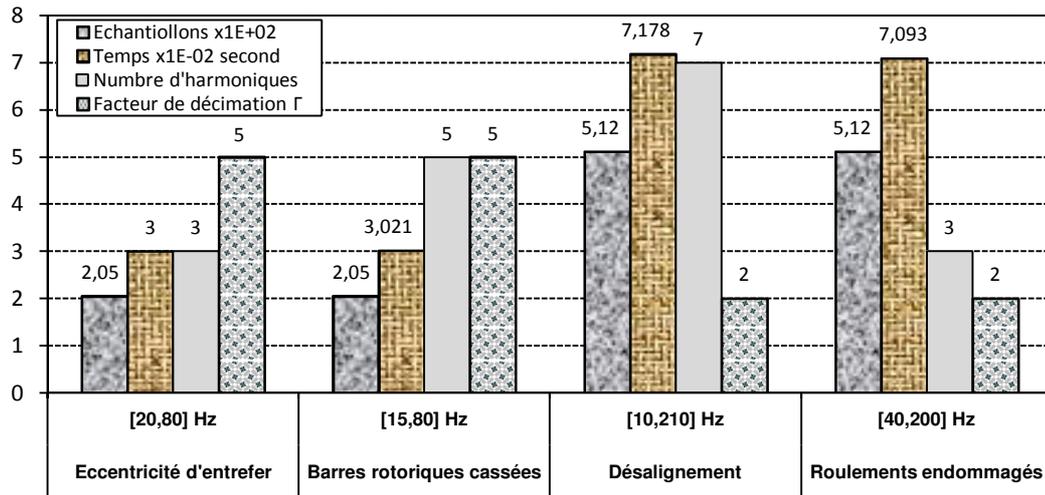


Figure V.16 Temps de calcul en fonction de la bande fréquentielle de défaut et le facteur de décimation

Dans l'application de cet algorithme, la croissance de  $F_s$  provoque l'augmentation du nombre des échantillons de signal. Cela conduit à une croissance de taille de la matrice d'auto-corrélation. Comme résultat, on peut dire que l'approche Fast-ESPRIT consomme un grand temps du calcul pour identifier avec précision toutes les fréquences incluses dans le signal traité. Donc, pour adapter cet algorithme de détection à un contrôle en temps réel, il faut faire un compromis entre le choix d'une fréquence d'échantillonnage et le temps de calcul investi par celui-ci.

## VI. Implémentation de Fast-ESPRIT sur un DSP

Avec le développement des processeurs du traitement du signal DSP, les défauts électromécaniques des machines à induction peuvent être facilement diagnostiqués. Cela est rendu possible par l'utilisation d'analyseur de spectre. On commande aujourd'hui avec le même DSP, une machine et on décèle ses défaillances à des stades précoces. Cependant, la mise en œuvre d'un algorithme de diagnostic et la prise de décision sont des procédures longues et compliquées. En effet, l'implémentation de tout algorithme de détection par estimation spectrale à haute résolution tel que Fast-ESPRIT sur ce type de processeurs exige la prise en compte de plusieurs conditions. Par conséquent, tout l'algorithme doit être déterminé avec soin pour ne pas violer le processeur DSP. En effet, les principaux obstacles à surmonter dans l'utilisation de Fast-ESPRIT [36, 38, 97] sont comme suit :

- Le choix de l'ordre du modèle de signal traité ;
- La dégradation des performances en traitement des signaux complexes, ayant un grand nombre de composantes fréquentielles, très proches et d'amplitudes très différentes ;

- L'occupation de la capacité d'une mémoire limitée ;
- La complexité de calcul ;
- Le niveau du bruit ne dépassant pas le seuil de précision admissible ;
- Les machines fonctionnent perpétuellement sous des modes transitoires ;
- L'amélioration de la résolution du spectre requière un enregistrement long des données ;
- La longueur finie des enregistrements de données engendre des effets de fuite ;

Il est donc important de prendre en considération toutes les précautions précitées pour avoir une bonne implémentation. Par exemple, on commence par la suppression de bruit à haute énergie de signal composite. Cette action efficace est réalisée par un filtre adapté à réponse impulsionnelle finie. Il maximise d'une manière optimale le rapport signal sur bruit SNR. Le signal filtré est ensuite échantillonné. Cela n'est réalisable que pour des machines fonctionnant dans des modalités stables pendant au moins une période de temps approuvable pour avoir un nombre d'échantillons du signal relativement faible.

Une autre technique appropriée permet d'alléger la complexité de calcul en traitement de grande quantité de données. C'est le découpage de la bande spectrale du signal en bandes ciblées et non ciblées. Cela signifie qu'au lieu de balayer l'ensemble du spectre, on ne se concentre que sur des fréquences de défaut attendu. Cela améliore la résolution. Cette technique a l'avantage d'éviter le claquage et l'endommagement du processeur DSP. L'élévation de température de ce dernier est aussi évitée. L'algorithme Fast-ESPRIT applique ce principe dans la recherche rapide des raies relatives aux défauts. La figure V.17 montre les étapes de filtrage, d'acquisition et de traitement du signal de courant statorique triphasé à l'aide d'un processeur DSP.

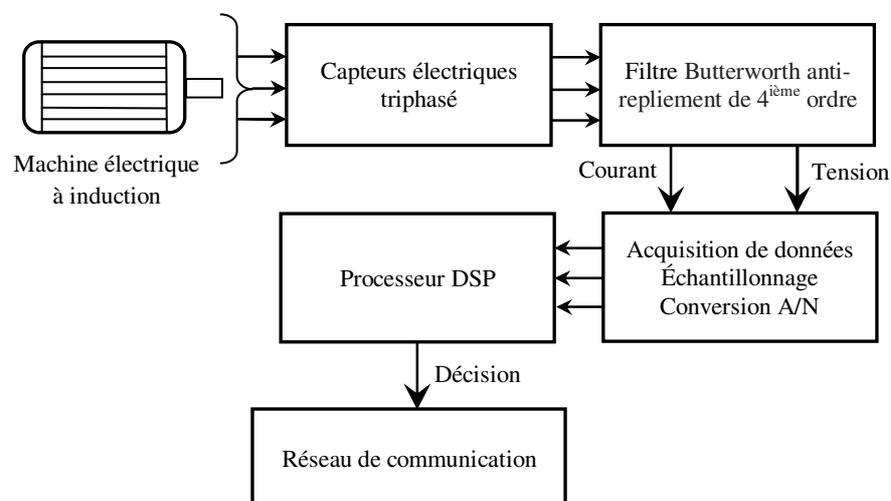


Figure V.17 Étapes de diagnostic d'une machine électrique à l'aide un DSP

En exploitant les résultats de détection de la méthode Fast-ESPRIT, on doit passer à la quantification du degré de sévérité d'un défaut dans l'intention de prendre des mesures correctives commodes vis-à-vis l'imminence ou l'incidence d'une défaillance. Le chapitre suivant présente une solution devant le besoin de classifier les défauts occurrents selon leurs types et d'éviter les fausses alarmes éventuelles.

# Chapitre VI

---

## Classification à base de Fast-ESPRIT et la logique floue

### I. Méthodes de classification

Les capteurs sont couramment utilisés comme outils de télésurveillance d'état, dans nombreux domaines. En effet, plusieurs méthodes liées à ces capteurs, sont actuellement proposées et développées pour détecter et diagnostiquer les défauts et les états anormaux dans diverses applications. Ces techniques s'appuient sur l'approche modèle, sur la mesure des signaux et sur l'informatique intelligente. Celle-ci permet des systèmes de traitement embarqué. Leur calcul est fondé sur des mesures. Tout processus de diagnostic doit donc être censé d'appliquer une procédure de décision effective et rapide afin de déterminer la cause, la nature et l'emplacement d'un défaut. Cela devrait être réalisé avec un minimum d'informations collectées. Le but est de minimiser les coûts de détection, d'arrêter le fonctionnement en tout moment s'il est nécessaire, d'indiquer les défaillances catastrophiques, de dicter leurs conséquences ultérieures et d'éviter la perte de production.

La méthode d'utilisation des mesures des vibrations traditionnelles peut présenter plusieurs inconvénients. On a par exemple : difficultés techniques et géographiques d'accès à la machine, influence de la voie de transmission et sensibilité à la position du capteur. Par conséquent, la façon la plus logique mettant en œuvre cette procédure est de comparer constamment les sorties du système avec des valeurs de consigne. En effet, la méthode MCSA basée sur l'analyse spectrale a été largement appliquée dans la détection et le diagnostic de défaut des machines électriques à induction [96, 38]. Elle a fourni des résultats satisfaisants dans de nombreuses applications industrielles. Cependant, cette technique peut mener à des conclusions erronées de diagnostic, car elle présente des limitations pratiques dues principalement aux raisons suivantes [38], [94] :

- La fuite spectrale : est le résultat d'échantillonnage du signal basé sur une fenêtre à temps fini. L'énergie de la fréquence fondamentale s'étend sur les autres fréquences et masque les autres composantes fréquentielles latérales ;

- Le besoin d'une haute résolution fréquentielle : est un indice indiquant la capacité d'analyse spectrale et discernant deux tonalités différentes ayant des fréquences voisines dans le signal, même s'elles sont de faibles amplitudes ;
- La variation des conditions de charge durant la période d'échantillonnage. Les harmoniques de défaut dépendant de glissement, varient avec la vitesse. Cela entraîne une difficulté dans l'identification de défaut et une imperfection de diagnostic ;
- La confusion entre les fréquences des vibrations mécaniques. La réduction de vitesse de certains dispositifs tels que la boîte à vitesses ou l'effet de la charge oscillante peuvent engendrer des fréquences latérales semblables à celles causées par des défauts réels ;

Tous ces inconvénients ont imposés la nécessité de développer et d'intégrer de nouvelles méthodes de diagnostic basées sur des outils avancés de l'intelligence artificielle. En effet, il s'est avéré indispensable de mettre en œuvre des techniques de détection robustes afin d'assurer une surveillance efficace des machines électriques.

Les méthodes de classification appelées aussi méthodes de discrimination ou de classement sont investies dans le développement de ces techniques. Elles sont généralement associées à des mécanismes d'aide à la décision. En effet, elles sont appliquées dans la reconnaissance et dans la localisation des défauts les plus probables à l'aide d'une base de données d'apprentissage. Elles visent la détermination de la classe d'appartenance d'objets, caractérisés par des descripteurs ou des symptômes valables qui portent suffisamment d'informations. Cela dépend donc de la mesure de similarité entre les objets selon certains critères pour tirer une conclusion de ressemblance aidant à construire plusieurs partitions ou regroupements Clustering dans lesquels ces objets seront classés [33, 34, 231, 232]. Il existe trois types de méthodes de classification, selon les résultats qu'elles génèrent :

- Booléens: les éléments appartiennent ou non aux classes ou aux ensembles ;
- Probabilistes: les éléments ont une probabilité d'appartenance à des classes booléennes, selon leurs diagnostics ;
- Graduelles ou floues: les éléments ont un degré d'appartenance aux ensembles ou aux classes ;

En outre, ces méthodes de connaissances reposent sur l'expertise humaine. On n'y utilise pas un modèle mathématique pour décrire les relations de causalité et de conséquence. Dans la littérature, on trouve plusieurs techniques appliquées dans la détection des défauts. Afin de s'approcher de l'intelligence humaine et d'améliorer l'efficacité et la précision du diagnostic, on

étude des modèles de pannes connus. Ces techniques sont appliquées séparément ou en arrangement, en employant des algorithmes d'intelligence artificielle tels que la reconnaissance des formes, les systèmes experts, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, la logique floue et la décision bayésienne [34, 37, 40, 41, 218, 219]. Dans cette dernière approche, le problème de classification des défauts de manière probabiliste est traité. On y quantifie les compromis entre les différentes décisions de classification et les coûts qui les accompagnent.

Pour la régulation automatique et le contrôle d'état des machines à induction, cette technique est mieux que les méthodes traditionnelles. Toutefois, elle n'est possible que lorsqu'elle est adaptée convenablement aux conditions de l'application envisagée. Elles se décomposent en deux étapes. La première est une phase d'apprentissage sous forme d'un ensemble de règles de décision (hypothèses-conclusions). La deuxième est la phase de test permettant d'étudier les performances du système. La figure VI.1 illustre le principe de fonctionnement des méthodes de connaissance appliquées au diagnostic.

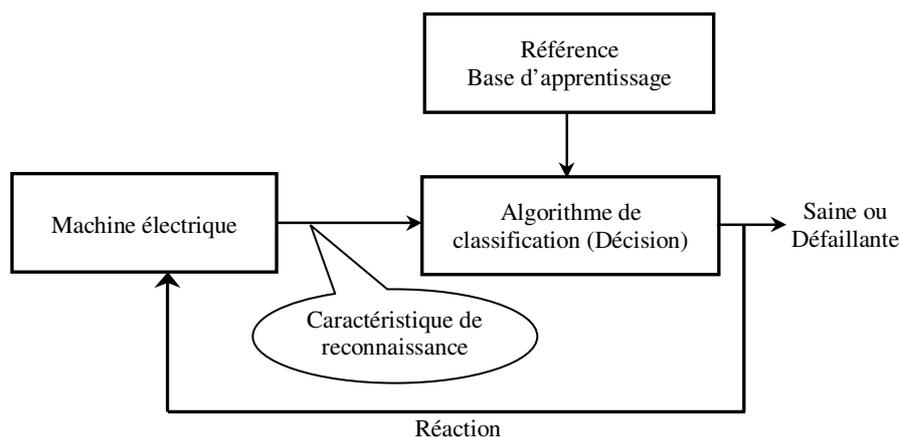


Figure VI.1 Schéma fonctionnel des méthodes de classification

La mise en œuvre d'un système basé sur la connaissance floue doit suivre une méthodologie spécifique, car la détermination exacte des règles d'inférence floue et des fonctions d'appartenance est une tâche difficile. En outre, la vérification et la validation de ce système floue nécessitent de nombreux tests avec du matériel. Par conséquent, tout utilisateur doit être conscient de ses exigences et de la limite de cette technique afin de garantir une bonne précision et une stabilité acceptable de la commande floue. Dans ce contexte, la recherche d'une solution appropriée pour des fausses alarmes est aussi un objectif de ce travail.

## II. Limitations et problématique de diagnostic d'une éolienne

Malgré les performances remarquées dans l'extraction efficace des harmoniques des défaillances et indiquées par le diagnostic de toute éolienne selon la méthode Fast-ESPRIT (entamée au chapitre V), cet algorithme ne permet pas de déterminer et de reconnaître plusieurs aspects pertinents tels que:

- La quantification de la sévérité (gravité) des défauts détectés ;
- La relation de cette sévérité avec le nombre des harmoniques de défaut ;
- La relation de sévérité avec les amplitudes des harmoniques de défaut ;
- La classification des défauts selon leurs types ;

Devant cette situation, la discrimination de l'ensemble de ces anomalies devient une tâche difficile surtout dans le cas de chevauchements entre les valeurs fréquentielles des harmoniques latérales caractérisant la signature de chaque type de défaut à part.

Dans la référence [73], les auteurs ont proposé un critère caractérisé par le paramètre  $C$  sans unité. C'est une métrique pour la mesure de degré de sévérité de tout défaut. Elle se base sur les amplitudes des harmoniques générées par celui-ci. Ce critère est exprimé par la formule suivante :

$$C = \sum_{k=1}^{N_h} \left( \frac{\hat{a}_k^2}{\hat{a}_0^2} \right) \quad (\text{VI.1})$$

Où  $N_h$  est le nombre des harmoniques de défaut détecté. Les  $\hat{a}_k$  sont leurs amplitudes estimées.  $\hat{a}_0$  est l'amplitude estimée de la fréquence fondamentale  $f_0=50\text{Hz}$ .

Cependant, cet indicateur influençant la mise en fonction de la machine, a un inconvénient majeur. Il ne permet pas de refléter la sévérité réelle d'un défaut détecté, surtout lorsque :

- Le nombre des harmoniques de ce défaut augmente. Cela signifie que ce défaut est plus grave, la machine nécessite un arrêt immédiat et une intervention de réparation urgente ;
- Les harmoniques des défauts simples génèrent des petites amplitudes  $\hat{a}_k$ . Celles-ci n'ont pas une grande influence ;
- L'augmentation de bruit environnant fait apparaître des petites harmoniques qui s'interprètent comme des vrais défauts ;
- Le déclenchement de fausses alarmes peut conduire à la perte de production et à un coût de maintenance plus élevé ;

Pour mettre en évidence la limitation du paramètre  $C$  formulé dans l'équation (VI.1), on prend des contre exemples de détection des défauts de désalignement et de barres rotoriques cassées comme illustré sur le tableau comparatif ci-dessous. Les paramètres utilisés dans la simulation de ces défauts, sont référencés au tableau IV.2 du chapitre IV.

D'après l'analyse de tableau VI.1, on remarque que l'indicateur de sévérité  $C$  ne permet pas de mesurer correctement le degré de sévérité pour un même type de défauts étudiés.

Tableau VI.1 Comparaison des valeurs d'indicateur  $C$  de sévérité pour différents types de défauts

Type de défaut	$f_0(\text{Hz})$	$N_h$	$f_h(\text{Hz})$	$I_h(\text{A})$	$C$
Désalignement1	50	6	21	0.2220	$43.10^{-4}$
			37.03	0.3256	
			79	0.2748	
			95.05	0.3731	
			137.03	0.1813	
			195.05	0.1524	
Désalignement2	50	4	21	0.275	$43.10^{-4}$
			37.03	0.385	
			79	0.39	
			137.03	0.23	
Barres rotoriques cassées1	50	4	22.525	0.302	$58.10^{-4}$
			25.825	0.4569	
			70.875	0.3583	
			74.175	0.3958	
Barres rotoriques cassées2	50	2	22.525	0.525	$58.10^{-4}$
			25.825	0.55	

Où  $f_0$  est la fréquence du fondamental. Les  $f_h$  et  $I_h$  sont les harmoniques latérales de la signature des défauts et leurs amplitudes correspondantes respectivement.

En effet, la valeur du paramètre  $C$  reste la même pour les deux cas malgré le changement de valeurs du nombre d'harmoniques et des valeurs d'amplitudes d'un cas à un autre. Cela signifie que l'algorithme de diagnostic utilisant ce paramètre permet la même décision face aux défauts de désalignement1 et de désalignement2, puisque  $C=43.10^{-4}$  dans les deux cas. On note la même observation pour les défauts des barres rotoriques cassées1 et des barres rotoriques cassées2 avec une valeur de  $C=58.10^{-4}$ . En outre, cet indicateur  $C$  prend, dans le cas d'une machine saine, la valeur 0 traduisant l'inexistence de défauts. Alors que pour une machine défaillante, le paramètre  $C$  prend des petites valeurs voisines de zéro dans certains cas. Ces valeurs provoquent des problèmes dans le calcul et dans la prise de décision pour l'état de la machine, car elles sont mal interprétées par le système de diagnostic. Cela veut dire qu'il y a une confusion entre la valeur de  $C$  indiquant un état d'anomalie et celle révélant un état sain de la machine surveillée puisque cette valeur de  $C$  est tellement proche de zéro. En fait, lorsque le nombre des harmoniques d'un défaut ou le nombre de ses amplitudes augmentent, cela implique que le défaut évolue et

s'aggrave progressivement [37-40, 87, 219]. On en conclut que cette métrique  $C$  présente une limitation remarquable dans la quantification du degré de sévérité d'un défaut donné. Pour résoudre cette problématique, on doit trouver une solution potentielle afin d'achever la détection et le diagnostic automatique avec plus de rigueur et de précision.

### III. Indicateur de sévérité d'un défaut

Puisqu'une machine électrique tournante à induction est à la conduite d'un système mécanique, l'arbre d'entrée de ce système est couplé de manière rigide au rotor de cette machine. L'arbre d'entrée de ce système est couplé de manière rigide au rotor de celle-ci. Le couple de charge exercé sur son rotor est une fonction de la vitesse d'arbre d'entrée et de ses fréquences modulées. Cela affecte le champ électromagnétique du stator. En conséquence, ce stator génère un courant dépendant de la variation du champ indiqué. Toute défaillance sera traduite par l'apparition d'un courant induit additif ayant des caractéristiques particulières de fréquence et d'amplitude. Celles-ci sont exploitables dans l'identification de la nature et de niveau d'importance d'anomalie incidente. Pour mesurer exactement l'intensité de sévérité de tout défaut, on a proposé un nouveau coefficient  $C$ . Il est dit indicateur de sévérité.

$$C = -N_h \sum_{k=0}^{N_h} \log_{10} \left( \frac{\hat{a}_k^2}{\hat{a}_0^2} \right) \quad (\text{VI.2})$$

Cet indicateur permet de quantifier précisément la gravité de tout défaut du système électromécanique relatif. Dans le cas d'existence d'une défaillance, ce paramètre prend une valeur élevée et divergente de 0. Elle est nulle dans le cas contraire, car on a ( $N_h=0$ ) et ( $\hat{a}_k=0$ ) :

$$C = -0 \times \sum_{k=0}^0 \log_{10} \left( \frac{\hat{a}_k^2}{\hat{a}_0^2} \right) = -0 \times \log_{10} \left( \frac{\hat{a}_0^2}{\hat{a}_0^2} \right) = -0 \times \log_{10} (1) = 0 \quad (\text{VI.3})$$

Cet indicateur permet de contourner la difficulté de l'entrecroisement de ses valeurs, pour des défauts de types différents. En effet, dans son perfectionnement, nous prenons en considération la proportionnalité de nombre  $N_h$  des harmoniques de défaut avec leurs amplitudes estimées  $\hat{a}_k$ . Ainsi, ce paramètre amélioré aide à mettre en place d'un plan précoce et préventif de télémaintenance en temps réel. Avec cet indicateur réformé, les mesures de niveau de sévérité des défauts étudiés au tableau VI.1 deviennent adéquates et satisfaisantes comme illustré sur le tableau VI.2.

Tableau VI.2 Comparaison entre les indicateurs de sévérité pour différents types de défauts

Type de défaut	$N_h$	Ancien $C$	Nouveau $C$
Désalignement1	6	$43.10^{-4}$	116.2649
Désalignement2	4	$43.10^{-4}$	48.1793
Barres rotoriques cassées1	4	$58.10^{-4}$	45.6676
Barres rotoriques cassées2	2	$58.10^{-4}$	10.1579

On remarque d'après le tableau VI.2 que la sévérité des défauts étudiés est correctement quantifiée. Elle est satisfaisante dans la mesure où toute valeur de  $C$  diffère nettement d'un type de défaut à un autre. Cela est proportionnel au nombre d'harmoniques et à la magnitude de leurs amplitudes.

#### IV. Nouvelle approche floue pour la reconnaissance et le diagnostic

Dans la surveillance d'état d'une machine électrique à induction, on doit tenir compte de la relation existante entre ses signaux d'entrée et ses indications d'état. Dans la plupart des défauts ayant des symptômes prévisibles au cours de leur développement, leur détection et leur interprétation ne nécessitent que des capteurs simples.

Par contre, la classification de l'état d'une telle machine et la détermination de la sévérité de ses défauts éventuels à partir de ses signaux d'entrée ne sont pas des tâches faciles, car ils sont affectés par de nombreux facteurs. Devant cette situation, l'expérience et l'intelligence sont extrêmement importantes. Elles le sont en effet, dans toute étape d'interprétation après analyse des informations recueillies de différents capteurs. L'état précis est ensuite indiqué en posant différentes probabilités de causes radicales provoquant la défaillance remarquée. Des efforts considérables sont actuellement forgés dans le développement des systèmes d'intelligence artificielle. Ceux-ci peuvent jouer des rôles similaires à ceux de l'homme. L'effort est donc concentré sur la conception d'un système informatisé imitant l'intelligence humaine. Il fera des diagnostics et prendra des décisions rapides et cohérentes. Cela exige une certaine quantité de connaissance, et d'expertise acquises sur la relation entre l'état de la machine et ses symptômes. Des informations déterminantes peuvent être exploitées en forme linguistique plutôt que d'être quantifiées pour accroître la confiance et l'exactitude de résultats de diagnostic. La logique floue, développée par Lotfi Zadeh vers l'année 1965, consiste une solution particulièrement adaptée dans telles circonstances. Cette théorie a trouvé un large éventail d'applications dans le contrôle, l'aide à la décision, la supervision, etc. notamment avec les travaux de E.H Mamdani dans le développement d'un système d'inférence flou FIS [88, 89]. De nombreux travaux de recherche avancés ont été réalisés et orientés dans ce sens pour développer des procédures d'identification

floue des défauts et leur isolement [89-92, 221-227]. La puissance de la logique floue à ce stade est en effet évidente. Elle fournit des informations de plus en plus précises sur l'état réel d'une machine électromécanique.

#### IV.1 Etapes de diagnostic flou

L'application de la logique floue confère une flexibilité très appréciable dans la prise de décision par rapport à d'autres méthodes [221-227]. Cette logique permet de raisonner à partir des données d'entrée imprécises pour engendrer des résultats de sortie avec incertitude de manière approximative ou graduelle. L'utilisation de cette technique dans l'approche de diagnostic décisionnel des défauts d'éoliennes qu'on propose est justifiée par la difficulté de mettre un modèle mathématique ou des formulations analytiques de la décision surtout lorsqu'un grand nombre d'entrées sont utilisées. Donc ce moyen permet de faire recours à un modèle empirique qui s'appuie sur des règles d'expertise humaine dans le domaine des machines électriques à induction qui peuvent être incorporées.

Dans la figure VI.2, on résume les étapes fonctionnelles de l'approche proposée. Ces règles floues s'appliquent sous les hypothèses suivantes :

- Le procédé physique est contrôlable ;
- L'existence d'une expertise humaine, qualitative et graduelle ;
- Les entrées et les sorties sont des grandeurs mesurables ou observables ;

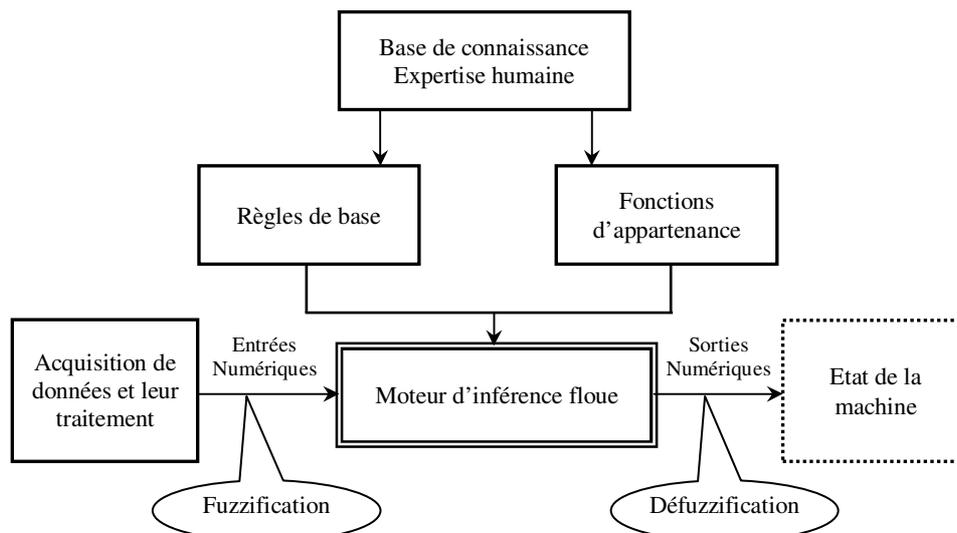


Figure VI.2 Schéma fonctionnel des méthodes de classification floues

La fuzzification permet d'associer à chaque valeur scalaire de domaine réel, une ou plusieurs variables linguistiques du domaine flou. Cette opération consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées dans les prédicats des règles. Alors que la défuzzification combine les résultats des conséquences de l'agrégation des règles applicables pour déduire la valeur de sortie réelle.

#### **IV.2 Approche de diagnostic proposée**

En mode de diagnostic, le courant statorique est analysé contre la signature associée, obtenue précédemment dans le mode d'apprentissage. Elle est en fonction de type de la machine surveillée. L'algorithme proposé, génère des décisions sur l'état de santé de cette machine. Il tient compte de divers critères et hypothèses floues. Une alarme est activée lorsque l'amplitude des harmoniques de défaut, dépasse un seuil limite. Le choix d'un système FIS comme une alternative et comme un outil puissant de représentation et de traitement de l'information est justifié par ses nouveaux avantages et ses capacités [91, 224- 226], telles que :

- Simulation de l'expertise d'un concepteur en conduite, en automatisation, en commande et en réglage temps réel des systèmes physiques ;
- Résolution simple, facile à réaliser et moins chère pour les systèmes de modélisation difficile ;
- Adaptabilité aux systèmes embarqués comme les contrôleurs flous implantés sur des microcontrôleurs ;
- Prise en compte de plusieurs variables et de fusion pondérée des grandeurs d'influence ;

Dans cette optique, on a focalisé les efforts sur l'amélioration du système de diagnostic. Le but est de le rendre sans perte excessive de précision. On a donc proposé l'intégration d'un moteur d'inférence floue qui combine deux techniques. Sur la figure VI.3, celui-ci est schématisé avec plus de détails. Il contient les différentes étapes effectuées par l'approche de diagnostic proposée. Dans un premier temps, il exploite les mesures collectées en temps réel, à partir des différents capteurs de vibration. Dans l'autre côté, les fréquences des harmoniques avec leurs amplitudes extraites de courant statorique, sont prises en considération pour calculer l'indicateur de sévérité  $C$ . Ces deux paramètres (vibration et niveau de sévérité) permettent de prendre une décision précise et exacte sur l'état de santé de la machine électrique choisie. Cette approche est évaluée en application au diagnostic d'un système éolien. Elle consiste à déterminer le nombre des sinusoïdes contenues dans le courant statorique acquis, (harmoniques+fondamental). Ce nombre est estimé à l'aide du critère *MDL* de Rissanen [220].

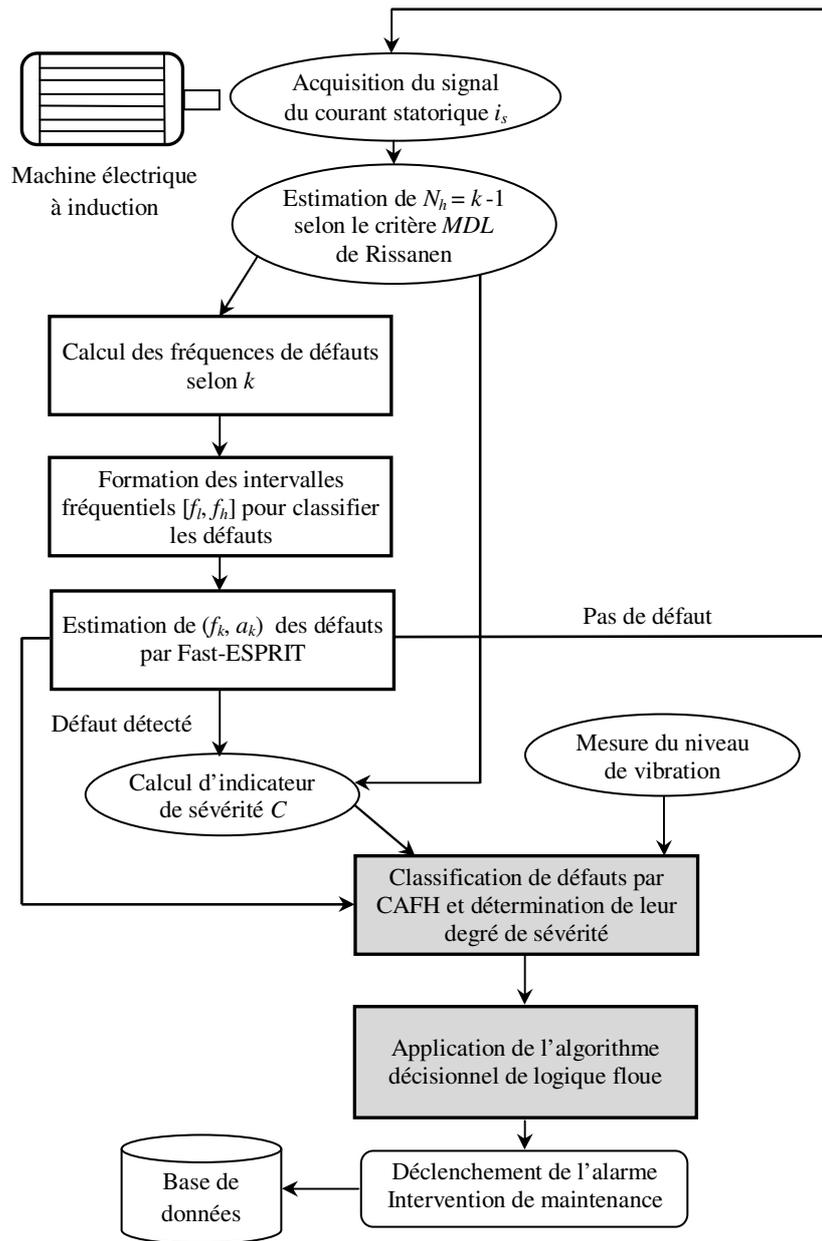


Figure VI.3 Etapes de l'algorithme de diagnostic proposé

L'algorithme appliqué calcule les fréquences caractérisant les différents défauts à partir de leurs modèles mathématiques indiqués au tableau IV.1 du chapitre IV. Ces défauts sont classés selon leurs types, reconnus par un indice  $i$  comme montré sur le tableau VI.3 suivant :

Tableau VI.3 Type des différents défauts étudiés selon leur indice

Type de défaut	Indice $i$
Barres rotoriques cassées	1
Roulements endommagés	2
Désalignement	3
Excentricité d'entrefer	4

En se basant sur les fréquences ainsi calculées, des intervalles bornés caractérisant la marge fréquentielle et le type de chaque défaut sont définis. Cela était nécessaire pour faciliter la tâche de discrimination. Par la suite, dans chacun de ces intervalles fréquentiels, les harmoniques indiquant la signature des défauts et leurs amplitudes sont recherchés à l'aide de l'algorithme Fast-ESPRIT. Un autre algorithme précis, décrit avec son organigramme sur la figure VI.4, exécute un processus de classification des différents défauts détectés selon leurs types.

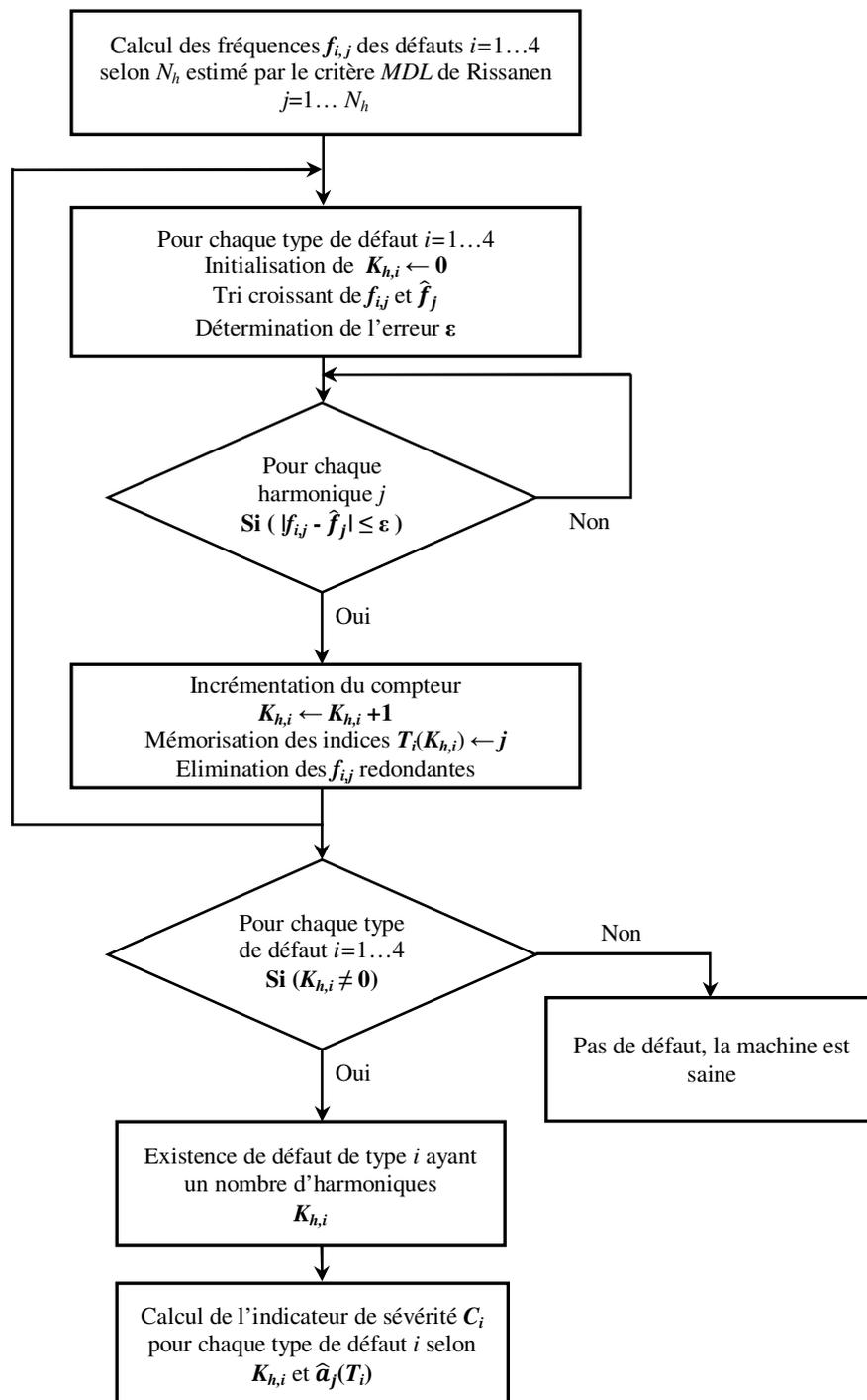


Figure VI.4 Organigramme de l'algorithme CAFH

Avec  $\hat{f}_j$  sont les harmoniques des défauts  $i = 1 \dots 4$  estimées par la méthode Fast-ESPRIT.  $N_h$  étant le nombre d'harmoniques pour chaque défaut  $i$ .  $K_{h,i}$  est le compteur d'harmoniques de défaut  $i$ .  $f_{i,j}$  sont les fréquences des défauts  $i=1 \dots 4$  calculées à partir de leurs modèles mathématiques.  $T_i$  étant le tableau contenant les indices  $j$  des fréquences  $\hat{f}_j$  vérifiant la condition de l'algorithme CAFH.  $\hat{a}_j$  sont les amplitudes estimées des harmoniques des défauts  $i$ .  $\varepsilon$  étant l'erreur maximale d'estimation spectrale effectuée par la méthode Fast-ESPRIT supposée connue.

Cet algorithme qu'on a développé est intitulé CAFH. Il effectue une comparaison entre les fréquences référentielles des défauts et celles estimées. Certes, il permet de rechercher les harmoniques des défauts modélisées existantes dans le vecteur des fréquences estimées en tenant compte de l'erreur d'estimation  $\varepsilon$  de la méthode Fast-ESPRIT. En effet, les harmoniques estimées vérifiant la condition de cette comparaison sont comptées et leurs indices sont stockés dans un vecteur pour extraire leurs amplitudes correspondantes à partir des amplitudes estimées par la méthode Fast-ESPRIT. Cela dans le but de calculer le niveau de sévérité de chaque défaut ainsi reconnu.

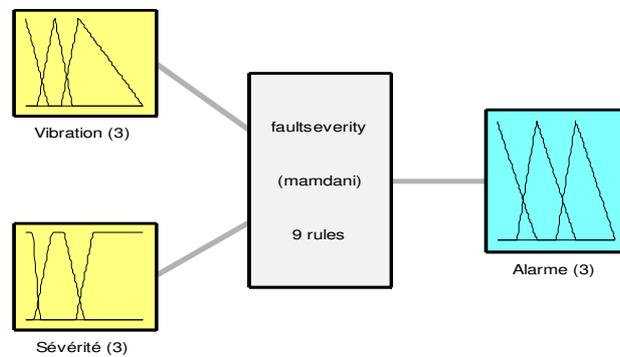
Dans la phase finale, un algorithme de prise de décision basé sur la logique floue, est appliqué. Il permet la quantification intelligente du niveau d'alarme selon la sévérité des défauts occurrents.

Cet algorithme exploite en entrée, les niveaux de vibration, et l'indicateur de sévérité  $C$  des défauts détectés. En sortie, il génère une décision comme un signal d'alarme. Cette décision indique la nature et le temps d'intervention du personnel de maintenance (urgente ou normale). Ce système de diagnostic offre plusieurs avantages :

- Maximiser les performances de système de surveillance et de détection tout en limitant l'aggravement des défaillances incidentes ;
- Connaître au bon moment, le type et la nature de défaillance pour planifier une intervention efficace à un temps exact et approprié ;
- Veiller à ne pas dégrader la durée de vie de la machine éolienne et éviter tout accident inattendu ;

## V. Simulation et analyse des résultats

Pour évaluer les performances du système de diagnostic proposé, on a simulé son algorithme avec le logiciel Matlab. On a tenu compte des différents types de défauts pouvant se produire dans une machine éolienne. Ces défauts sont décrits sur le tableau IV.1 de chapitre IV. Le modèle mathématique du courant statorique adopté dans cette simulation, est celui décrit par l'équation (IV.1) de chapitre IV. Les paramètres des simulations ainsi que les valeurs nominales de la génératrice sont les mêmes valeurs résumées dans le tableau V.1 du chapitre V. Le système d'inférence flou FIS qu'on a utilisé est constitué de quatre éléments essentiels : le fuzzificateur, le moteur d'inférence, la base des règles et le défuzzificateur. Sur la figure VI.5, on présente une description détaillée de l'architecture de ce système avec l'outil de simulation Matlab.



Système sévérité d'un défaut : 2 entrées, 1 sortie, 9 règles

Figure VI.5 Architecture du système d'inférence flou

Sur le tableau VI.4, on montre les paramètres et les méthodes employées dans ce système d'inférence flou.

Tableau VI.4 Paramètres du FIS

Paramètre	Valeur
Type de règles floues	mamdani
Nombre d'entrées	2
Nombre de sorties	1
Nombre de règles	9
Méthode AND	min
Méthode d'implication	min
Méthode d'agrégation	max
Méthode de défuzzification	centroïde

Cependant, l'utilisation de la forme trapézoïdale et triangulaire des fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées floues (vibration et indicateur de sévérité  $C$ ) est choisie arbitrairement en suivant les conseils de l'expert ou en faisant des études statistiques réalisées

pratiquement. Cela est justifié également par leur adaptation aux valeurs numériques réelles nécessaires au diagnostic. En plus de leur simplicité et leur rapidité dans le calcul de la valeur du degré d'appartenance [225-227]. Le choix de positions de ces fonctions d'appartenance ainsi que leurs chevauchements doit respecter certaines règles :

- Leur forme doit être convexe ;
- Les fonctions d'appartenance des sous-ensembles d'entrées voisins doivent se chevaucher partiellement (au minimum) afin qu'il n'y ait pas de zones indéterminées de non-intervention du régulateur ou zones mortes, tandis que pour ceux de sorties (souvent des triangles), cette précaution n'est pas nécessaire ;
- Eviter d'imbriquer plus de deux sous-ensembles et éviter leurs chevauchements trop importants, sinon cela conduit à des problèmes d'instabilité du régulateur ou à l'aplatissement de la surface de décisions ;

Sur les figures VI.6 et VI.7, on illustre les différents ensembles flous avec leurs fonctions d'appartenance.

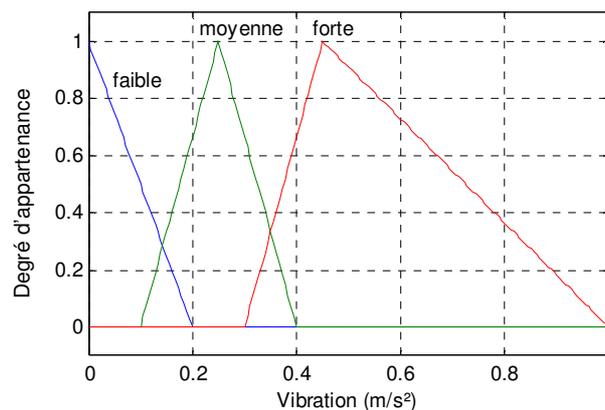


Figure VI.6 Ensembles flous de la variable vibration

Ces ensembles ainsi construits par l'expertise humaine sont utilisés dans le système d'inférence flou FIS. Celui-ci est intégré dans l'algorithme de diagnostic proposé. En outre, la vibration peut être mesurée en fonction de déplacement, de vitesse ou d'accélération. En effet, des accéléromètres sont utilisés en mesure des vibrations. Ils envoient les données au contrôleur central de l'éolienne [38, 40, 41, 219, 229, 230]. Dans les endroits éloignés ou inaccessibles pour l'acquisition, la transmission sans fil des données est une solution efficace. Le système FIS employé fonctionne avec deux entrées de trois niveaux différents. Afin de simplifier la lecture des niveaux de sortie d'une manière précise et sans ambiguïté, on a choisi une sortie alarme de trois niveaux possibles. Elle est illustrée sur la figure VI.8.

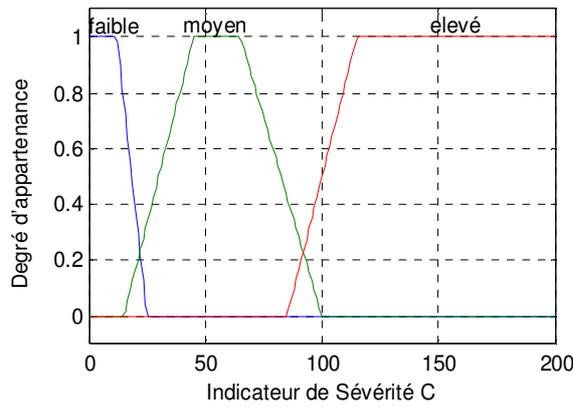


Figure VI.7 Ensembles flous de la variable indicateur de sévérité C

Par ailleurs, ce système permet d'exploiter neuf règles SI-ALORS. Elles sont présentées sur le tableau VI.5.

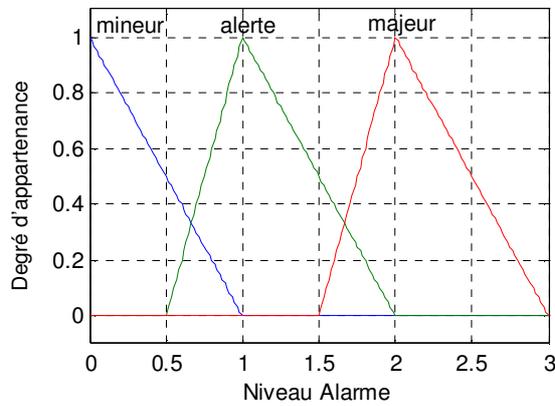


Figure VI.8 Ensembles flous de la variable alarme

Elles permettent d'analyser toutes les situations possibles et d'engendrer en conséquence la sortie avec plus d'exactitude. Pour produire l'alarme, le système FIS passe à la phase de défuzzification.

Tableau VI.5 Règles SI-ALORS du système d'inférence flou

Entrées		Sortie
Vibration	Indicateur de sévérité C	Niveau d'alarme
Faible	Faible	Mineur
Faible	Moyen	Mineur
Faible	Elevé	Moyen
Moyenne	Faible	Moyen
Moyenne	Moyen	Moyen
Moyenne	Elevé	Majeur
Forte	Faible	Moyen
Forte	Moyen	Majeur
Forte	Elevé	Majeur

Dans cette étape, le processus de production d'un résultat quantifiable en logique floue permet d'interpréter les degrés d'appartenance des ensembles flous puis de les transformer en une décision spécifique ou en une valeur réelle.

Cependant, avant qu'une sortie soit défuzzifiée, toutes les sorties floues du système sont regroupées avec un opérateur d'agrégation utilisant l'union max [226, 227]. La technique de défuzzification, la plus courante et la plus précise est appelée « centroïde flou ». Elle est connue aussi sous le nom « centre de l'aire » ou « centre de gravité ». Cette technique a été développée par Sugeno en 1985 [226, 227]. Elle peut être exprimée comme suit :

$$x^* = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_i(x) x dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_i(x) dx} \quad (\text{VI.4})$$

Où  $x^*$  est la sortie défuzzifiée,  $\mu_i(x)$  est la fonction d'appartenance agrégée et  $x$  est la sortie. Avec cette formule (VI.9), la décision finale qui est la sortie du FIS correspond à l'abscisse du centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance résultante caractérisant l'ensemble flou issu de l'agrégation des conclusions. La figure VI.9 montre la fonction d'appartenance résultante pour la variable de sortie et sa transformation en grandeur réelle numérique.

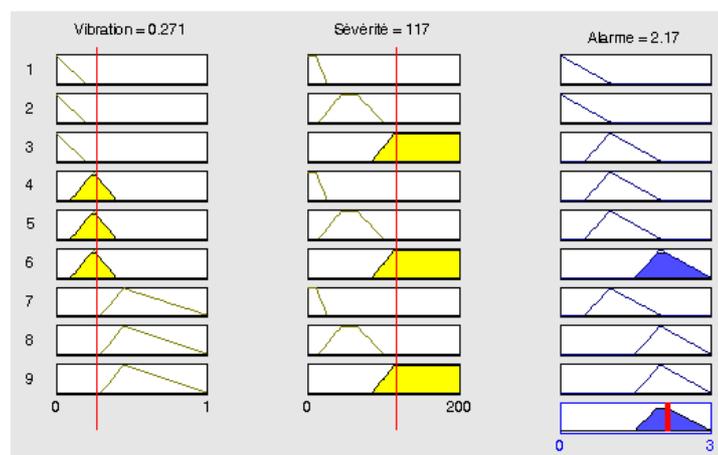


Figure VI.9 Règles d'inférence floues et la sortie du système

Sur la figure VI.10, on voit la surface des décisions en fonction de chacune des variables avec le système d'inférence flou qu'on a utilisé. On remarque également que ces décisions sont sans discontinuités, flexibles et non linéaires, plus proche de l'intelligence humaine. L'algorithme de diagnostic proposé, inclut alors la gestion d'alarmes par le système FIS. Lorsque cet algorithme identifie les défauts produits dans le générateur d'éolienne, il stocke leurs données périodiquement dans des fichiers journaliers. Ceux-ci sont manipulés à partir de la base de

données du serveur de télésurveillance. Le système FIS permet de définir les conditions et les seuils de déclenchement des alarmes.

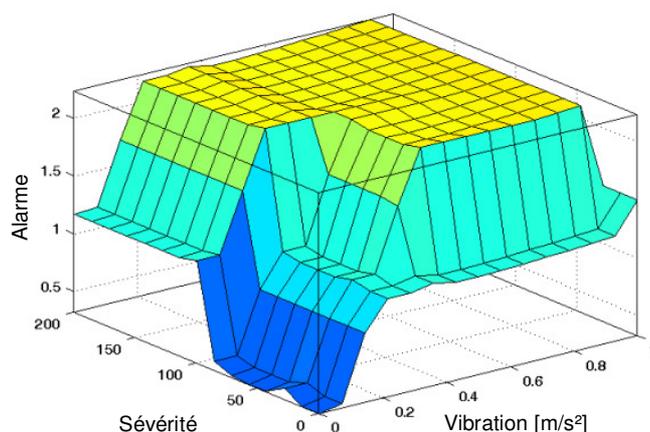


Figure VI.10 Ensemble des décisions du système flou

Ces dernières sont des notifications de surveillance. Elles sont activées à toute anomalie détectée. Ce FIS peut générer aussi de simples avertissements en fonction de l'évolution des conditions de générateur. Il a en plus, la fonctionnalité d'inciter l'exécution des actions automatiques immédiates lorsque certaines défaillances s'aggravent. Ces actions ont des degrés liés aux niveaux de sévérité de défauts. Le tableau VI.6 résume la signification de chaque niveau d'alarme, le mode opératoire de la machine éolienne et la procédure qui lui a été associé [229, 230].

Tableau VI.6 Actions et modes opératoires selon le niveau d'alarme

Niveau d'alarme	Action associée
Mineur	- L'état opérationnel de l'éolienne en mode MARCHE - Aucune alarme n'est activée
Moyen	- Notification d'occurrence d'un événement qui dépasse les seuils de tolérance - Mise en mode DEGRADE pour réduire l'impact de la défaillance - Déclenchement d'une alarme d'alerte - Nécessite d'une consultation et d'une révision
Majeur	- Evolution d'une défaillance en état fatal - Mise de l'éolienne en mode ARRÊT - Information de personnel de maintenance sur l'intervention de réparation immédiate et urgente

La localisation des machines éoliennes défaillantes au niveau d'un parc, est très simple. On détermine leurs positions selon leurs adresses IP avec la technologie du système GPS (Global Positioning System). On intègre l'interconnexion du système de diagnostic proposé, le module du système de contrôle et le module de télésurveillance à distance IESRCM. Cet ensemble est installé sur chaque machine éolienne [202-206, 228]. Dans ce système, on utilise une liaison de communication sans fil pour la commande et la collecte des données. Ainsi, par l'intermédiaire

d'un centre de supervision, la télémaintenance et le contrôle de tout parc, deviennent des tâches aisées grâce à la collaboration des systèmes indiqués [228- 230]. Avec la simulation, on a évalué les performances de détection de système de diagnostic proposé. Dans le cas d'existence multiple et en même temps, des défauts de différents types, on a caractérisé notre simulation avec les paramètres des défauts indiqués dans le tableau VI.7 suivant. La valeur ajoutée de notre contribution, est le décèlement précis des anomalies et leur localisation rapide avant qu'elles induisent une défaillance ou une dégradation grave. Cela est dans le but de pouvoir prendre à temps, les mesures et les procédures appropriées.

Tableau VI.7 Paramètres de simulation des différents types de défauts

Type de défaut	$f_{i,j}$ (Hz)	$a_{i,j}$ (A)	$f_0$ (Hz)	$a_0$ (A)	Vibration ( $m/s^2$ )	SNR (dB)
Barres rotoriques cassées	22.525	0.2220	50	10	0.271	20
	25.825	0.2356				
	70.875	0.1748				
	74.175	0.1831				
	119.225	0.1813				
	122.525	0.1934				
Roulements endommagés	89.248	0.275	50	10	0.271	20
	158.9	0.231				
	189.2	0.175				
	258.9	0.132				
Désalignement	20.99	0.1022	50	10	0.271	20
	37.03	0.2169				
	79.01	0.1158				
	137.03	0.2283				
Excentricité d'entrefer	1.65	0.325	50	10	0.271	20
	98.35	0.311				

Ces mesures permettent de réagir selon le niveau d'alarme déclenchée. En effet, le système de régulation de l'éolienne isole, reconfigure les parties et les composantes défaillantes, ayant un niveau de sévérité moyen. Dans ce cas, il fonctionne en mode dégradé. Dans le cas d'un défaut grave, ce système active le circuit d'arrêt d'urgence et déconnecte la machine éolienne du réseau électrique. Cela permet de réaliser une mise de cette machine, en état de réparation, de façon sûre.

Les résultats de simulation sont résumés dans le tableau VI.8. On remarque d'après ces résultats que l'approche proposée est satisfaisante. Elle est précise dans la détection et dans le diagnostic même en présence simultanée de plusieurs défaillances de différentes natures et même dans un environnement bruyant. On constate également d'après le tableau VI.8 l'existence d'un écart remarquable entre les différents indicateurs de sévérité  $C_i$  caractérisant chaque type de défaut. Cela reflète la robustesse du paramètre de sévérité qu'on a remédié puisqu'il a évité les chevauchements. Une autre remarque concerne les valeurs exactes des compteurs  $K_{h,i}$ . On en

conclut que la tâche de classification a été accomplie avec succès. Cela favorise l'implémentation de l'algorithme proposé dans la procédure de surveillance et de contrôle automatisé d'une éolienne.

Tableau VI.8 Résultats de simulation

$\hat{f}_j$ (Hz)	$\hat{a}_j$ (A)	$\varepsilon$	$N_{h,i}$	$K_{h,i}$	$C_i$	Alarme $A_i$	Décision	Type de défaut	
258.8847	0.1340	0.08	16	6	122.3749	2.17	majeur	Barres rotoriques cassées ( $i=1$ )	
189.1870	0.1781								
158.9021	0.2301								
137.0332	0.2295		16	4	54.5028	1.17	alerte	Roulements endommagés ( $i=2$ )	
122.5209	0.1957								
119.2175	0.1872								
1.6520	0.3192		16	4	57.6619	1.17	alerte	Désalignement ( $i=3$ )	
98.3493	0.3191								
49.9999	9.9833								
89.2451	0.2802		16	2	11.9680	1.17	alerte	Excentricité d'entrefer ( $i=4$ )	
37.0317	0.2197								
79.0304	0.1182								
70.8679	0.1822								
25.8290	0.2430								
20.9691	0.1040								
74.1792	0.1784								
22.5162	0.2191								

# Conclusion

---

Le diagnostic automatisé basé sur l'analyse spectrale à haute résolution offre plusieurs avantages pour la surveillance et le contrôle à distance d'un système physique en temps réel. Sa mise en œuvre fait appel à l'intégration des méthodes de traitement numérique du signal dans les systèmes à base des capteurs intelligents. Ces derniers forment des outils puissants d'aide au diagnostic. On a choisit dans ce travail d'employer ce type de dispositifs pour contrôler l'état de santé de la partie mécanique d'une éolienne. Ce choix est justifié non seulement par l'importance de l'énergie électrique éolienne dans la stratégie nationale de l'état qui encourage l'intégration des énergies renouvelables au réseau de production d'électricité mais aussi par le fait que les machines éoliennes nécessitent périodiquement certaines maintenances afin d'assurer une durée de vie acceptable.

Dans le contexte de résoudre les problématiques décrites dans l'introduction, les principaux résultats qu'on a apporté dans le cadre de cette thèse résident dans ce qui suit :

Après une étude approfondie, on a pu déterminer les types des systèmes à base de capteurs intelligents, leurs exigences ainsi que leurs limitations et leurs principaux défis qu'il faut surmonter. Dans le but de les développer et de les rénover, on a contribué par l'introduction de nouveaux indicateurs permettant la mesure de l'efficacité et de performance de ce genre de systèmes intelligents dans leur mise en exploitation dans une application spécifique.

La proposition d'une architecture centralisée de télésurveillance et de diagnostic des défaillances d'un parc éolien puisque la production de l'énergie électrique à l'aide d'éoliennes implique des besoins de télémaintenance et de prise de décision. Pour vérifier cette exigence, on a réalisé une étude de conception d'un capteur intelligent embarqué, autonome intégrant une méthode d'estimation spectrale à super résolution. Son rôle est l'indication instantanée des anomalies à partir de la signature spectrale du courant statorique issu de la génératrice d'une éolienne.

Néanmoins, l'acheminement sans fil de données à partir de ce dispositif intelligent vers la station de base d'analyse doit tenir en compte un compromis entre le coût énergétique, la qualité de service et le fonctionnement en temps réel. À cet égard, une étude comparative des

performances de six protocoles sans fil : Bluetooth, UWB, ZigBee, Wi-Fi, Wi-Max et GSM/GPRS est effectuée. À l'appui de cette comparaison, on a déterminé un ensemble de critères d'évaluation quantitative d'un tel protocole qui sont associés aux contraintes et aux spécifications d'une application. Ces indicateurs ainsi proposés consistent des véritables métriques qui mesurent le niveau de performance d'un protocole. Cela permet aux administrateurs du réseau de télésurveillance de faciliter la tâche de choisir un protocole adéquat qui convient à une application pratique de détection intelligente ayant des caractéristiques optimales au niveau du temps de transmission, d'efficacité du codage de données, du taux d'erreur binaire, du type de modulation, d'efficacité énergétique et de la taille du réseau. En outre, l'adéquation de ces protocoles est fortement influencée par de nombreux autres facteurs décisifs qui s'imposent tels que la fiabilité du réseau, la capacité de liaison radio, la sécurité, la conformité avec l'application à envisager et le coût d'installation qui doivent être pris en considération. En outre, on a rencontré la difficulté de la coexistence de plusieurs types de technologies sans fil dans une même zone de surveillance. La résolution de ce problème consiste une perspective qui nécessite une étude de conception d'un transceiver collaboratif permettant de détecter les différentes technologies et par conséquent de s'auto-ajuster pour reconfigurer les communications d'un mode à un autre entre les infrastructures hétérogènes tout en évitant les ressources et les coûts supplémentaires. Comme perspective de ce travail, on propose d'étendre cette recherche pour étudier l'impact du schéma de modulation sur le prolongement de la zone de couverture surveillée, sur la bande passante, sur le nombre de capteurs servis et connectés et sur la consommation d'énergie.

Par ailleurs, pour résoudre le challenge de dissipation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil, on a pu améliorer l'efficacité énergétique de plusieurs protocoles tels que : LEACH, SEP, DEEC, TDEEC. Cela à l'aide de diverses techniques : K-means, logique floue, algorithmes d'optimisation. Les résultats obtenus dans ces travaux réalisés en collaboration avec les collègues de notre équipe de recherche montrent une augmentation remarquable de la durée de vie du réseau en plus de la croissance du trafic de paquets de données effectué par les nœuds.

Quant à la détection des harmoniques caractérisant les défauts, la discrimination classique reposant sur la technique DSP (Densité Spectrale de Puissance) estimée par le périodogramme n'est pas fiable, car elle présente des limitations surtout en présence d'une perturbation. Cela nous a poussé de rechercher d'autres techniques. En fait, on a montré que les méthodes d'estimation spectrale à haute résolution pourraient être efficacement utilisées pour la détection de défauts d'éoliennes. Cette mission peut être achevée par la surveillance en ligne des

composantes spectrales contenues dans le courant statorique et qui sont générées par le champ magnétique créé par l'anomalie occurrente. Le choix du modèle mathématique du courant statorique issu de la génératrice d'éolienne forme un premier obstacle qu'on a rencontré. En outre, devant la diversité des méthodes d'estimation spectrale à haute résolution, une investigation est réalisée avec plusieurs types de défauts et sous un environnement différemment bruité. Cela afin de mesurer leur robustesse et pour chercher parmi lesquelles les plus qualifiées d'accomplir cette détection. On a déduit à cet égard que la précision de l'estimation spectrale dépend du degré de perturbation du signal, du niveau de sévérité d'un défaut, de la fréquence d'échantillonnage et du nombre d'échantillons de données prélevés. La comparaison avec simulation sous Matlab qu'on a effectué entre ces algorithmes a prouvé la supériorité de l'algorithme ESPRIT sur les autres, suivi par R-MUSIC qui permet à son tour, dans tous les cas étudiés, d'atteindre une précision de détection très élevée. Cependant, ces deux algorithmes ont un temps de calcul relativement plus grand comparé aux autres approches. Cela peut obstruer leur mise en œuvre en temps réel. Malgré cette difficulté, la méthode ESPRIT reste exploitable dans la conception d'un système intelligent embarqué dédié au diagnostic des défaillances électromécaniques d'une éolienne.

Dans le sens de cette idée, notre apport essentiel qu'on a développé est la proposition d'une nouvelle stratégie de surveillance permettant le contrôle et la supervision à distance des machines éoliennes d'une manière interactive et en temps réel notamment celles qui se situent dans des endroits lointains, inaccessibles ou dans la mer. L'étude et l'analyse de conception du circuit électronique du système intelligent de surveillance et de commande IESRCM proposé est réalisée à l'aide des simulations informatiques au moyen des outils logiciels Proteus ISIS et OPNET. Ce fait, pour évaluer la capacité en détection des défauts par ce système qui offre la qualité de suivre l'état des différents paramètres physiques d'une machine d'éolienne de façon périodique. Une étude comparative a été également effectuée pour apprécier les performances de ce système lors de son intégration avec les modules sans fil GPRS ou Wi-Max pour achever la tâche de transfert de données vers le centre de pilotage via une communication IP. Les résultats de cette comparaison ont favorisé l'incorporation du module Wi-Max dans le système proposé en raison de ses avantages par rapport au module GPRS. Ces résultats montrent que ce dispositif conçu est rentable et adapté non seulement à une application dans un parc éolien, mais aussi il trouve son application dans d'autres domaines tels que la domotique, l'industrie, etc. Les questions de télémaintenance et d'entretien à distance sont maintenant en mesure d'être résolues

avec cet outil interactif efficace. Le futur travail sera focalisé sur la réalisation et l'expérimentation d'un prototype de ce système de surveillance dans la pratique.

On tire de ce travail que cette structure de surveillance permet de diminuer les coûts de déplacement du personnel de maintenance, rentable en termes de l'infrastructure, d'équipements et de réalisation. En plus, elle remplace la structure câblée et évite ses problèmes relatifs (coupures, parasites, configuration,...). C'est une technique simple et performante qui augmente la durée de vie des éoliennes.

L'exploitation de la méthode d'estimation spectrale à haute résolution ESPRIT-TLS dans le but d'une surveillance prédictive d'éoliennes constitue une véritable application d'un capteur intelligent. Cette suggestion est affirmée par la grande robustesse et la résolution spectrale approuvable que possède cette technique dans l'identification des fréquences à partir d'une acquisition du signal de données à courte durée même en présence d'un bruit de mesure gênant. Pourtant, on a constaté que cet algorithme présente un inconvénient remarquable malgré qu'il possède une puissance intéressante dans la précision et malgré sa mise en œuvre à faible coût. En réalité, son temps de calcul relatif à sa complexité algorithmique élevée augmente avec l'accroissement du nombre d'échantillons d'observation et avec la dimension de la matrice d'auto-corrélation du signal d'entrée. Nécessairement, ce traitement demande une taille mémoire importante pour l'exécuter. Cela rend leur implémentation en temps réel très limitée.

Pour contourner cet obstacle, on a proposé une amélioration de la technique ESPRIT-TLS pour la rendre applicable en temps réel à condition de ne pas dégrader ses performances. Une nouvelle version de l'algorithme ESPRIT-TLS est développée dans cette thèse intitulée Fast-ESPRIT. L'élaboration proposée est effectuée en s'inspirant de la technique de filtrage passe bande à l'aide d'un filtre récursif IIR de Yule-Walker et de la technique de décimation. L'étude d'évaluation de la technique proposée à travers son application dans la détection de quatre types de défauts d'une éolienne est réalisée avec des simulations sous Matlab. L'analyse des résultats obtenus confirme que l'algorithme Fast-ESPRIT offre une précision spectrale satisfaisante dans l'identification des harmoniques des défauts étudiés ainsi que leurs amplitudes, une complexité réduite avec un rapport admissible, une réduction de l'espace mémoire requis pour son exécution 5 fois inférieur et la diminution du temps de calcul d'environ 14,25 fois moins. On a constaté que cette méthode est capable de discriminer les spectres avec une meilleure résolution même en présence d'un nombre important d'harmoniques de défauts différents. Comme perspectives de ce travail, on propose d'étendre cette étude pour :

- Chercher la relation entre l'ordre du filtre récursif IIR de Yule-Walker et l'erreur d'estimation de la méthode à l'aide de la borne de Cramer-Rao dans le but de minimiser l'effet de filtrage sur la précision de la technique Fast-ESPRIT ;
- Rechercher la possibilité d'améliorer l'efficacité de détection de la méthode Fast-ESPRIT dans le cas des défauts ayant des harmoniques à faibles amplitudes ;
- Optimiser la taille de la matrice d'auto-corrélation du signal étudié par l'introduction des méthodes d'optimisation tel que l'algorithme méta-heuristique FA (FireFly) ;
- Focaliser l'attention sur l'étude de l'impact du facteur de décimation, de la fréquence d'échantillonnage, du nombre d'échantillons du signal et des fréquences du signal sur la précision de la méthode Fast-ESPRIT ;
- Investiguer et appliquer d'autres techniques de filtrage adaptative telles que Wiener, Notch, RLS, Kalman pour augmenter la précision et la vitesse de convergence de la méthode ESPRIT en vue de minimiser l'erreur d'estimation dûe au filtrage ;
- Etudier d'autres types de défauts tels que l'endommagement des engrenages, la détérioration des pâles, impact de lubrification, etc. ;
- L'application de l'algorithme Fast-ESPRIT sur les signaux biomédicaux pour l'amélioration du diagnostic spectral des pathologies relatives au système nerveux dans le but d'exploiter la totalité des informations contenues dans le signal PEV (Potentiel Evoqué Visuel) puisque la méthode de latence utilisée par les médecins dans les hôpitaux présente de fortes limitations ;
- L'application de l'algorithme Fast-ESPRIT sur les méthodes AOA et DOA pour améliorer en temps réel la localisation des nœuds d'un réseau de capteurs sans fil ce qui permet de minimiser la quantité d'énergie dissipée par les capteurs dans cette procédure ;

Le diagnostic à l'aide de la technique Fast-ESPRIT reste insuffisant puisqu'il ne permet pas de reconnaître le type et le niveau de gravité d'un défaut détecté par ses harmoniques et ses amplitudes. La mise en œuvre d'une technique efficace et robuste permettant de bien diagnostiquer avec précision l'état d'une éolienne était nécessaire. Dans ce sens, on a proposé une nouvelle approche qui contrôle en temps réel l'état de fonctionnement d'une éolienne. Cette approche combine entre la méthode Fast-ESPRIT qu'on a développé, un algorithme de classification de défauts selon les valeurs fréquentielles de leurs harmoniques intitulé CAFH et un algorithme de la logique floue qui collabore avec les capteurs de vibration localisés sur les différentes composantes d'éolienne. Ce dernier algorithme permet la prise de décision face à l'imminence d'une défaillance, le déclenchement d'alarmes et la prise des mesures de réaction adéquates et instantanées. Un nouvel indicateur de taux de gravité de chaque type de défaut a été

formulé afin d'augmenter la précision de détection. La simulation sous Matlab de cette approche sous quatre types de défaillances en présence d'un bruit montre que la technique développée a une meilleure robustesse dans la classification de défauts et dans l'avertissement rapide et précis du niveau de sévérité d'un défaut. Cette approche offre divers avantages pour le diagnostic automatisé à distance tels que la réduction d'intervention répétitive du personnel de maintenance pour une réparation éventuelle ce qui évite les fausses alarmes. Les résultats obtenus qualifient la mise en application de cette approche dans un parc éolien en particulier et dans les réseaux électriques intelligents futurs smart grid en général vu les fonctionnalités d'interactivité qu'ils offrent. Comme perspective de ce travail de recherche on propose de développer une surveillance automatisée des machines éoliennes par le biais des réseaux de neurones artificiels combinés à la méthode Fast-ESPRIT. Cela permet de résoudre considérablement le problème de classification car le réseau neuronal se charge alors des tâches de la reconnaissance, de la localisation et de la classification des défauts à l'aide d'une base de données d'apprentissage ce qui augmente la fiabilité de discrimination.

Les problèmes liés à la commande et à la régulation automatique du système éolien peuvent également être résolus car le capteur intelligent développé joue un rôle primordial dans la chaîne d'asservissement et de prise de décision du système.

Finalement, on tient à mentionner que toutes les approches qu'on a proposé et développé en plus les résultats qu'on a obtenu dans le cadre de ces travaux de recherche ainsi réalisés ont été publiés dans des journaux internationaux indexés. Elles ont été également le sujet de notre participation dans de nombreuses manifestations scientifiques spécialisées nationales et internationales.

# Références Bibliographiques

---

- [1] Verdone, R., Dardari, D., Mazzini, G. & Conti, A., “Wireless Sensor and Actuator Networks, Technologies, Analysis and Design”, Academic Press, Elsevier, London, 2008
- [2] Mireille Bayart et al., “Capteurs et Actionneurs Intelligents”, GT 18-4 CIAME SEE, Doc. S 7520
- [3] S. C. Mukhopadhyay, Palmerston North, “Internet of Things Challenges and Opportunities”, Smart Sensors, Measurement and Instrumentation, Volume 9, Springer International Publishing Switzerland 2014
- [4] José Cecílio, Pedro Furtado, “Sensors in Industrial Time-Critical Environments”, Computer Communications and Networks, Springer International Publishing Switzerland 2014
- [5] Subhas Chandra Mukhopadhyay, Joe-Air Jiang, “Wireless Sensor Networks and Ecological Monitoring”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013
- [6] Amiya Nayak, Ivan Stojmenovic, “Wireless Sensor and Actuator Networks Algorithms and Protocols for Scalable Coordination and Data Communication”, John Wiley & Sons Ltd., 2010
- [7] Walteneus Dargie et Christian Poellabauer, “Fundamentals of Wireless Sensor Networks Theory and Practice”, Wiley series on Wireless Communications and Mobile Computing, first edition, John Wiley & Sons Ltd., 2010
- [8] Yan Zhang et al., “RFID and Sensor Networks Architectures, Protocols, Security and Integrations”, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, 2010
- [9] Ivan Stojmenovic, “Handbook of Sensor Networks Algorithms and Architectures”, Wiley Series on Parallel and Distributed Computing, 2005, John Wiley & Sons Ltd.
- [10] Ana-Belén Garcia-Hernando et al., “Problem Solving for Wireless Sensor Networks”, Computer Communications and Networks series, Springer-Verlag London Limited, 2008
- [11] Kazem Sohraby et al., “Wireless Sensor Networks Technology, Protocols, and Applications”, Wiley series on Wireless Communications and Mobile Computing, 2007, John Wiley & Sons Ltd.
- [12] John Park et al., “Practical Data Communications for Instrumentation and Control”, Newnes, Great Britain, 2003
- [13] Azzedine Boukerche, “Algorithms and Protocols for Wireless Sensor Networks”, Wiley Series on Parallel and Distributed Computing, John Wiley & Sons Ltd., 2009
- [14] Rajeev Shorey et al., “Mobile, Wireless, and Sensor Networks Technology, Applications, and Future Directions”, Wiley series on Wireless Communications and Mobile Computing, 2006, John Wiley & Sons Ltd.
- [15] Feng Zhao, Leonidas J. Guibas, “Wireless Sensor Networks: An Information Processing Approach”, The Morgan Kaufmann Series in Networking Series Editor, Elsevier 2004
- [16] Elena Gaura et al., “Wireless Sensor Networks Deployments and Design Frameworks“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [17] H. Karl, A. Willig, “Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks”, Wiley, 2005.
- [18] E.H. Callaway, “Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols”, CRC Press, 2004
- [19] Fei Hu, Xiaojun Cao, “Wireless Sensor Networks Principles and Practice”, CRC Press, 2010

- [20] Wendi Beth Heinzelman, “Application-Specific Protocol Architectures for Wireless Networks”, Doctoral Thesis, Department of Electrical Engineering and Computer Science Massachusetts Institute of Technology, June, 2000
- [21] Priyanka Rawat et al., “Wireless sensor networks: a Survey on Recent Developments and Potential Synergies”, Springer, Journal of Supercomputing, April 2014, Volume 68, Issue 1, pp 1-48
- [22] Jennifer Yick et al., “Wireless sensor network survey, Journal of Computer Networks”, Elsevier, 52 (2008), pp 2292–2330
- [23] Randy Frank, “Understanding Smart Sensors”, Second Edition, Artech House Boston-London 2000
- [24] Damien Luttenbacher, “Modélisation du Concept Capteur Intelligent par une Approche Orientée Objet : Application à un Capteur Intelligent de Température”, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy1, Ecole Supérieure des Sciences et Technologies de l’ingénieur de Nancy, 1997
- [25] F. Brissaud, D. Charpentier, “Capteurs Intelligents : Nouvelles Technologies et Nouvelles Problématiques pour la Sûreté de Fonctionnement”, Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, Lambda-Mu 16, Avignon, France, 2008
- [26] Norbert NOURY, “Du Signal à l’Information : Le Capteur Intelligent Exemples Industriels et en Médecine”, Université Joseph Fourier de Grenoble 1, Habilitation à diriger des Recherches 2002, Laboratoire des Techniques de l’Imagerie, de la Modélisation et de la Cognition (TIMC-IMA&), UMR CNRS 5525
- [27] Eric GAUDREAU et al., “Pilotage réactif des systèmes de production à l’aide de capteurs intelligents”, 6ème Congrès International de Génie Industriel, France Besançon, Juin 2005
- [28] André Dittmar et al., “Les Capteurs Biomédicaux pour la Télésurveillance”, INSA de Lyon, CNRS LPM
- [29] Vincent Le Cam et al., “Applications des Réseaux de Capteurs Intelligents et de la Communication Sans Fil à l’Instrumentation des Structures de Génie Civil”, Université de Paris-Est, LCPC, MI, Paris, France, BLPC N°273, Décembre 2008, pp 9-37
- [30] Guillaume Terrasson, “Contribution à la Conception d’Émetteur-Récepteur Pour Micro-capteurs Autonomes”, Thèse de Doctorat, Université Bordeaux 1, Novembre, 2008
- [31] Fei Hu, Qi Hao, “Intelligent Sensor Networks : The Integration of Sensor Networks”, Signal Processing and Machine Learning, CRC Press, 2012
- [32] Janos Gertler, “Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems : Basic concepts with simple examples”, Marcel Dekker Inc., New York, May 1998
- [33] Bernard Dubuisson et al., “Diagnostic, Intelligence Artificielle et Reconnaissance des Formes”, Hermes Science Publications, Collection : Traité IC2, série Productique, 2001
- [34] Jean-Claude Trigeassou, “Electrical Machines Diagnosis”, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2011
- [35] René Husson, “Control Methods for Electrical Machines”, ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc., 2009
- [36] Erik Leandro Bonaldi, et al., “Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors”, Chapter 20, InTech, 2012
- [37] Peter Vas, “Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives Application of Fuzzy, Neural, Fuzzy-Neural, and Genetic-Algorithm-Based Techniques”, Oxford University Press 1999
- [38] Hamid A. Toliyat et al., “Electric Machines Modeling, Condition Monitoring, and Fault Diagnosis”, CRC Press Taylor & Francis Group NW 2013, ISBN 978-1-4200-0628-5
- [39] M. Blödt, P. Granjon, B. Raison, J. Regnier et al., “Mechanical Fault Detection In Induction Motor Drives Through Stator Current Monitoring-Theory and Application Examples,” Fault Detection, Wei Zhang (Ed.), pages 451-488, 2010

- [40] Amiya R. Mohanty, "Machinery Condition Monitoring Principles and Practices", CRC Press Taylor & Francis 2015
- [41] Peter Tavner et al., "Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines", The Institution of Engineering and Technology IET, London, United Kingdom, 2008
- [42] Francisco José Vedreño Santos, "Diagnosis of Electric Induction Machines in Non-Stationary Regimes Working in Randomly Changing Conditions", Thesis Report, Universitat Politècnica de València, November 2013
- [43] Gérard Blanchet, Maurice Charbit, "Digital Signal and Image Processing using Matlab", ISTE USA 2006
- [44] André Quinquis, "Digital Signal Processing using MATLAB", ISTE Ltd, London UK, 2008
- [45] Dimitris G. Manolakis et al., "Statistical and Adaptive Signal Processing", Artech House 2005
- [46] J. Proakis and D. Manolakis, "Digital Signal Processing : Principles, Algorithms, and Applications", New York : Macmillan Publishing Company, 1992
- [47] H. Vincent Poor, "An Introduction to Signal Detection and Estimation", Second Edition, Springer-Verlag texts in electrical engineering, Virginia USA 1994
- [48] M. Hayes, "Digital signal processing and modeling", Wiley, New York, NY, 1996
- [49] John L. Semmlow, "Biosignal and Biomedical Matlab-Based Applications", Marcel Dekker, Inc New York 2004
- [50] Harry L. Van Trees, "Optimum Array Processing Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory", John Wiley & Sons Ltd, 2002
- [51] Mourad Barkat, "Signal Detection and Estimation", Artech House, INC., Second Edition, 2005
- [52] Math H. J. Bollen, Irene Yu-Hua Gu, "Signal Processing of Power Quality Disturbances", IEEE Press Series on Power Engineering Mohamed E. El-Hawary, Series Editor, John Wiley & Sons, Inc., 2006
- [53] Paulo Fernando Ribeiro et al., "Power Systems Signal Processing for Smart Grids", John Wiley & Sons, Inc., 2014
- [54] Alain Ducasse et al., "Estimation Fréquentielle et Echantillonnage : Les Bons Choix", Dix-septième colloque GRETSI, Vannes, 13-17 septembre 1999, pages 235-238
- [55] Van der Veen et al., "Sub-Space Based Signal Analysis Using Singular Value Decomposition", Proceeding of IEEE, 81(9), pages 1277-1308, September 1993
- [56] F. Al-Badour et al., "Vibration Analysis of Rotating Machinery Using Time-Frequency Analysis and Wavelet Techniques", Elsevier Journal of Mechanical Systems and Signal Processing Volume 25, Issue 6, August 2011, pages 2083-2101
- [57] Andrew Kusiak et al., "The Prediction and Diagnosis of Wind Turbine Faults", Elsevier Journal of Renewable Energy, Volume 36, Issue 1, January 2011, Pages 16-23
- [58] Yaguo Lei et al., "A Review on Empirical Mode Decomposition in Fault Diagnosis of Rotating Machinery", Elsevier Journal of Mechanical Systems and Signal Processing 35 (2013), pages 108-126
- [59] Abdenour Soualhi et al., "Detection and Diagnosis of Faults in Induction Motor Using an Improved Artificial Ant Clustering Technique", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 9, September 2013, pages 4053-4062
- [60] Robert Bond Randall, "Vibration-based Condition Monitoring : Industrial, Aerospace and Automotive Applications", Wiley, New York, NY, 2011
- [61] T.T. Georgiou, "Spectral Estimation via Selective Harmonic Amplification", IEEE Trans. on Automatic Control, 46(1): 29-42, January 2001

- [62] P. Billingsley, "Probability and Measure", second edition, John Wiley and Sons, New York, 1986
- [63] El Houssin El Bouchikhi et al., "A Comparative Study of Time-Frequency Representations for Fault Detection in Wind Turbine", IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society
- [64] Yassine Amirat et al., "Wind Turbine Bearing Failure Detection Using Generator Stator Current Homopolar Component Ensemble Empirical Mode Decomposition", IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society
- [65] T.T. Georgiou, "Spectral Analysis Based on the State Covariance: The Maximum Entropy Spectrum and Linear Fractional Parameterization," IEEE Trans. on Automatic Control, 47(11): 1811-1823, November 2002
- [66] Łobos T. et al., "Advanced Signal Processing Methods of Harmonics and Inter-Harmonics Estimation", IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection, Amsterdam, 9-12 April 2001, pages 315-318
- [67] Neelam Mehala et al., "Condition Monitoring Methods, Failure Identification and Analysis for Induction Machines", International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing, Issue 1, Vol. 3, 2009, pages 10-17
- [68] Ioannis Tsoumas et al., "A Comparative Study of Induction Motor Current Signature Analysis Techniques for Mechanical Faults Detection", SDEMPED 2005- International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives Vienna, Austria, 7-9 September 2005
- [69] El Houssin El Bouchikhi et al., "A Parametric Spectral Estimator for Faults Detection in Induction Machines", 39th Annual IEEE Conference of the Industrial Electronics Society, IECON 2013
- [70] Don-Ha Hwang et al., "Robust Diagnosis Algorithm for Identifying Broken Rotor Bar Faults in Induction Motors", Journal of Electrical Engineering & Technology, JEET, Vol. 9, No. 1, January 2014
- [71] Shahin Hedayati Kia et al., "A High-Resolution Frequency Estimation Method for Three-Phase Induction Machine Fault Detection", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 4, AUGUST 2007
- [72] Young-Woo Youn et al., "MUSIC-based Diagnosis Algorithm for Identifying Broken Rotor Bar Faults in Induction Motors Using Flux Signal", Journal of Electrical Engineering & Technology, JEET, Vol. 8, No. 2, 2013, pages 288-294
- [73] El Houssin El Bouchikhi et al., "Induction Machine Fault Detection Enhancement Using a Stator Current High Resolution Spectrum", IECON 2012- 38th Annual IEEE Conference on Industrial Electronics Society
- [74] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT - Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques", IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing. ASSP-37 (1989), pages 984-995
- [75] Zbigniew Leonowicz, "Parametric Methods for Time-Frequency Analysis of Electric Signals", Politechnika Wrocławska Wroclaw University of Technology, Poland, 2nd edition January 2007
- [76] Przemyslaw Janik et al., "Advanced Signal Processing Methods for Evaluation of Harmonic Distortion Caused by DFIG Wind Generator", 16th PSCC, Glasgow, Scotland, July 14-18, 2008
- [77] H. C. So et al., "Linear Prediction Approach for Efficient Frequency Estimation of Multiple Real Sinusoids: Algorithms and Analysis", IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 53, No. 7, July 2005
- [78] C. J. Crabtree et al., "Detecting Incipient Wind Turbine Gearbox Failure: A Signal Analysis Method for On-line Condition Monitoring", European Wind Energy Conference (EWEC), Warsaw 19 April 2010
- [79] M.E.H. Benbouzid et al., "What Stator Current Processing-Based Technique to Use For Induction Motor Rotor Faults Diagnosis ?", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.18, Issue 2, IEEE Power & Energy Society, June 2003, pages 238-244
- [80] El Houssin El Bouchikhi et al., "Induction Machine Faults Detection using Stator Current Parametric

Spectral Estimation”, *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, Vol.52-53, February 2015, pages 447-464

- [81] M. Blödt, P. Granjon, B. Raison, and G. Rostaing, “Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 4, pages 1813-1822, April 2008
- [82] V.F. Pisarenko, “The Retrieval of Harmonics from a Covariance Function”, *Geophysics J. Roy. Astron. Soc.* 33 (1973), pages 347-366
- [83] Sophocles J. Orfanidis, “Optimum Signal Processing”, MCGRAW-HILL publishing company, New York, 2nd edition 2007
- [84] R.O Schmidt, “A Signal Subspace Approach to Multiple Emitter Location and Spectral Estimation”, Ph.D. Thesis, Stanford University, Stanford, CA, 1981
- [85] Jian Zhang et al, “Rank Reduced ESPRIT Techniques in the Estimation of Principle Signal Components”, *Proceedings 5th Australian Communications Theory Workshop*, Australian National University, 2004
- [86] Niaoqing Hu et al, “Early Fault Detection using A Novel Spectrum Enhancement Method for Motor Current Signature Analysis”, *7th WSEAS Int. Conf. on Artificial Intelligence, Knowledge Engineering and Data Bases (AIKED’08)*, University of Cambridge, UK, Feb 20-22, 2008
- [87] E. H. Mamdani, “Application of Fuzzy Algorithms for the Control of a Simple Dynamic Plant”, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, Volume:121 , Issue:12, IET (December 1974), pages 1585-1588
- [88] Benoît Robyns et al., “Vector Control of Induction Machines Desensitisation and Optimisation Through Fuzzy Logic”, Springer-Verlag London 2012
- [89] Abhisek Ukil, “Intelligent Systems and Signal Processing in Power Engineering”, Springer-Verlag, 2007
- [90] N. Reema et al., “Switching Fault Detection and Analysis of Induction Motor Drive System Using Fuzzy Logic”, *International Conference on Advances in Green Energy (ICAGE)*, IEEE 17-18 Dec. 2014
- [91] S. Simani et al., “Residual Generator Fuzzy Identification for Wind Farm Fault Diagnosis”, the 19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa, 24-29 August 2014
- [92] El khatib Kamal et al., “Fault Diagnosis Based on Fuzzy Observers for Wind Energy Conversion Systems”, *International Conference on Renewable Energy and Eco-Design in Electrical Engineering iREED 2011*, 23-24 March 2011, Université Lille Nord, Lille, France
- [93] Djamel Benferhat, “Conception d’un Système de Communication Tolérant la Connectivite Intermittente Pour Capteurs Mobiles Biométriques - Application à la Supervision Médicale de L’activité Cardiaque de Marathonien”, Université de Bretagne Sud, Octobre 2013
- [94] Fouad Giri, “AC Electric Motors Control : Advanced Design Techniques and Applications”, John Wiley & Sons Ltd, 2013
- [95] Gérard-André Capolino et al., “Modern Diagnostics Techniques for Electrical Machines, Power Electronics & Drives”, *Guest Editorial, IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 3, March 2015
- [96] Joan Pons-Llinares et al., “Advanced Induction Motor Rotor Fault Diagnosis Via Continuous and Discrete Time Frequency Tools ”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 3, March 2015
- [97] M. Pineda-Sanchez et al., “Diagnosis of Induction Motor Faults Using A DSP and Advanced Demodulation Techniques”, the 9th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Valencia Aug. 2013, pp 69-76
- [98] Mohamed El Hachemi Benbouzid, “A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection”, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, October 2000
- [99] Ouaïdie Bennouna et al, “Condition Monitoring & Fault Diagnosis System for Offshore Wind Turbines”,

[https://zet10.ipee.pwr.wroc.pl/record/425/files/invited\\_paper\\_3.pdf](https://zet10.ipee.pwr.wroc.pl/record/425/files/invited_paper_3.pdf)

- [100] Elie Al-Ahmar et al, “Wind Energy Conversion Systems Fault Diagnosis Using Wavelet Analysis”, *International Review of Electrical Engineering* 3, 4 2008, pages 646-652
- [101] E. Al Ahmar et al, “Advanced Signal Processing Techniques for Fault Detection and Diagnosis in a Wind Turbine Induction Generator Drive Train: A Comparative Study”, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Atlanta, États Unis, 2010
- [102] R. W. Hyers et al., “Condition Monitoring and Prognosis of Utility Scale Wind Turbines”, *Institute of Materials, Minerals and Mining and W. S. Maney & Son Ltd Energy Materials* 2006, Vol.1 No.3, pages 187-203
- [103] Julia Nilsson et al., “Maintenance Management of Wind Power Systems Using Condition Monitoring Systems-Life Cycle Cost Analysis for Two Case Studies”, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, Vol. 22, No. 1, March 2007
- [104] Mohanraj.M et al., “A CAN Bus Based System for Monitoring and Fault Diagnosis in Wind Turbine”, *International Conference on Emerging Trends in VLSI, Embedded System, Nano Electronics and Telecommunication System (ICEVENT)*, Tiruvannamalai, 7-9 Jan 2013, pages 1-3
- [105] Chun-Liang Hsu, “Constructing Transmitting Interface of Running Parameters of Small-Scaled Wind-Power Electricity Generator With WSN Modules”, *Expert Systems with Applications Journal* 37, Elsevier 2010, pages 3893–3909
- [106] Ammar Zaher et al., “Database Management for High Resolution Condition Monitoring of Wind Turbines”, *Proceedings of the 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Glasgow 1-4 Sept. 2009
- [107] M.C. Mallikarjune Gowda et al, “Improvement of the Performance of Wind Turbine Generator Using Condition Monitoring Techniques”, *Proceedings of 7th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO 2013)*, IEEE 2012
- [108] Yassine Amirat et al, “Wind Turbines Condition Monitoring and Fault Diagnosis Using Generator Current Amplitude Demodulation”, *IEEE International Energy Conference and Exhibition (EnergyCon)*, 2010
- [109] Lucian Mihet Popa et al., “Condition Monitoring of Wind Generators”, *IEEE Industry Applications Society 38th Annual Meeting, IAS’03*, Salt Lake City, Utah USA, October 2003, Vol. 3 IEEE Signal Processing Society, pp 1839-1846
- [110] Christopher J. Crabtree, “Survey of Commercially Available Condition Monitoring Systems for Wind Turbines”, *Durham University School of Engineering and Computing Sciences*, 2nd November 2010, Revision: 05
- [111] Shuangwen Sheng, Paul Veers, “Wind Turbine Drive train Condition Monitoring - an Overview”, *Mechanical Failures Prevention Group: Applied Systems Health Management Conference Virginia Beach*, Virginia May 10-12, 2011
- [112] Xiang Gong, “On-line Non-Intrusive Condition Monitoring and Fault Detection for Wind Turbines”, *DigitalCommons@University of Nebraska – Lincoln*
- [113] Martin Kluge, Michael Danitschek, “Condition Monitoring Systems (CMS) in Wind Turbines”, *Ifm Electronic Gmbh*, update version : 22.07.2010
- [114] Wu Chunming and Cheng Liang, “The Monitoring System for the Wind Power Generation Based on the Wireless Sensor Network”, *International Conference on Future Electrical Power and Energy Systems 2012*, *Energy Procedia* 17, pp 1020-1027
- [115] Asif Saeed, “On line Condition Monitoring System for Wind Turbine Case Study”, *Master Thesis*, University of Kalmar, Blekinge Institute of Technology, October 2008
- [116] Fausto Pedro et al., “Condition Monitoring of Wind Turbines : Techniques and Methods”, *Elsevier Journal of Renewable Energy* 46 (2012), pp.169-178

- [117] Zhigang Tian et al., “Condition Based Maintenance Optimization for Wind Power Generation Systems Under Continuous Monitoring”, Elsevier Journal of Renewable Energy, Volume 36, Issue 5, May 2011, pages 1502-1509
- [118] Tavner, P. “How Are We Going to Make Offshore Wind Farms More Reliable ?”, SUPERGEN Wind General Assembly on March 20, 2011 at Durham University, UK
- [119] Sheng, S. “Investigation of Various Wind Turbine Drive train Condition Monitoring Techniques”, Wind Turbine Reliability Workshop, August 2-3, 2012 Albuquerque, NM
- [120] Mohamed Becherif et al, “On Impedance Spectroscopy Contribution to Failure Diagnosis in Wind Turbine Generators”, International Journal on Energy Conversion 1, 3 (2013) pages 147-153.
- [121] Yassine Amirat et al, “Wind Turbines Condition Monitoring and Fault Diagnosis Using Generator Current Amplitude Demodulation”, IEEE International Energy Conference and Exhibition (EnergyCon), 2010
- [122] Jean-Paul M., G. Linmartz’s, “Wireless Communication, The Interactive Multimedia CD-ROM”, Baltzer Science Publishers, Amsterdam, ISSN 1383 4231, Vol. 1, No.1, 1996
- [123] Helen Fornazier et al., “Wireless Communication : Wi-Fi, Bluetooth, IEEE 802.15.4, DASH7”, ROSE 2012 ELECINF344 / ELECINF381, Télécom ParisTech, site web: <http://rose.eu.org/2012/category/admin>
- [124] Lehsaini Mohamed, “Diffusion et Couverture Basées Sur le Clustering dans les Réseaux de Capteurs: Application à la Domotique”, Thèse de Doctorat, Université de Franche-Comté Besançon, U.F.R Sciences et Techniques, École Doctorale SPIM, Juillet 2009
- [125] Trevor Pering et al., “CoolSpots: Reducing the Power Consumption of Wireless Mobile Devices with Multiple Radio Interfaces”, ACM 1-59593-195-3/06/0006, MobiSys’06, June 19–22, 2006, Uppsala, Sweden
- [126] Travis Collins et al., “A Green Approach to a Multi-Protocol Wireless Communications Network”, Major Qualifying Project to obtain the Degree in Bachelor of Science in Electrical and Computer Engineering, Faculty of Worcester Polytechnic Institute, University of Limerick 2011, <http://www.wpi.edu/Academics/Projects>
- [127] Wendi B. Heinzelman et al., “Energy-scalable Algorithms and Protocols for Wireless Microsensor Networks”, Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP’00, 2002
- [128] Aurélien Géron, “Wi-Fi Professionnel la Norme 802.11, le Déploiement, la Sécurité ”, 3<sup>ème</sup> édition DUNOD
- [129] **Saad Chakkor**, Mostafa Baghoury et al, “Comparative Performance Analysis of Wireless Communication Protocols for Intelligent Sensors and Their Applications”, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, SAI Publisher, Vol. 5 No.4, May 2014, pp 76-85
- [130] **Saad Chakkor**, Mostafa Baghoury et al, “Efficiency Evaluation Metrics for Wireless Intelligent Sensors Applications”, International Journal of Intelligent Systems and Application, Mecs Press Publisher, Vol. 6 No.10, September 2014, pp 1-10
- [131] **Saad Chakkor**, Mostafa Baghoury et al, “Optimal Operating Performances of Wireless Protocols for Intelligent Sensors Applications”, Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, CIS Journal Publisher, Vol.5 No.4, April 2014, pp 265-275
- [132] Tony Ducrocq, “Auto-organisation des Réseaux Sans-fil Multi-sauts dans les Villes Intelligentes ”, Thèse de Doctorat de l’Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille1, France, Novembre 2013
- [133] José Cecílio, Pedro Furtado, “Wireless Sensors in Heterogeneous Networked Systems Configuration and Operation Middleware”, Computer Communications and Networks series, Springer International Publishing Switzerland 2014

- [134] Mostafa Baghoury, **Saad Chakkor**, Abderrahmane Hajraoui, "Fuzzy Logic Approach to Improving Stable Election Protocol for Clustered Heterogeneous Wireless Sensor Networks", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol.53 No.3, July 2013, pp 334-339
- [135] Cheikh El Ahmadi, **Saad Chakkor** et al, "New Approach to Improving Lifetime in Heterogeneous Wireless Sensor Networks Based on Clustering Energy Efficiency Algorithm", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Vol. 61 No.2, March 2014, pp 405-412
- [136] El Ahmadi Cheikh, **Saad Chakkor** et al, "Energy Efficient Enhancement of TDEEC Wireless Sensors Network Protocol Based on Passive RFID Implementation", *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, Vol.3 No.5, May 2014, pp 6647- 6653
- [137] Mostafa Baghoury, **Saad Chakkor**, Abderrahmane Hajraoui, "Ameliorate Threshold Distributed Energy Efficient Clustering Algorithm for Heterogeneous Wireless Sensor Networks", *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, SAI Publisher, Vol.5 No.5, May 2014, pp 84-88
- [138] Mostafa Baghoury, **Saad Chakkor**, Abderrahmane Hajraoui, "Improving Threshold Distributed Energy Efficient Clustering Algorithm for Heterogeneous Wireless Sensor Networks ITDEEC", 3ième Colloque Internationale en Science et Technologie de l'information, IEEE CIST 2014, Tétouan
- [139] Harsh Kupwade Patil, Stephen A. Szygenda, "Security for Wireless Sensor Networks using Identity-Based Cryptography", Taylor & Francis Group, CRC Press, October 18, 2012 by Auerbach Publications
- [140] Javier López, Jianying Zhou, "Wireless Sensor Network Security", *Cryptography and Information Security Series*, IOS Press, 1 January 2008
- [141] Kui Ren, Wenjing Lou, "Communication Security in Wireless Sensor Networks", VDM Verlag Dr. Mueller e.K. Publisher, 15 January 2008
- [142] Behrouz A. Forouzan, "Data Communications and Networking", McGraw Hill High Education, 4th Edition, New York USA, 2007
- [143] Qinghua Wang and Ilangko Balasingham, "Wireless Sensor Networks - An Introduction", *Wireless Sensor Networks: Application-Centric Design*, Yen Kheng Tan (Ed.), InTech, 2010
- [144] Markus Becker, "Services in Wireless Sensor Networks Modelling and Optimisation for the Efficient Discovery of Services", *Advanced Studies Mobile Research Center Bremen*, Springer Vieweg 2014
- [145] Vijay K. Garg, "Wireless Communications and Networking", Elsevier Morgan Kaufmann Publishers, USA, 2007
- [146] Jin-Shyan Lee et al., "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi", *The 33<sup>rd</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Taipei, Taiwan, November 5-8, 2007
- [147] Adil Koukab et al., "A GSM-GPRS/UMTS FDD-TDD/WLAN 802.11a-b-g Multi-Standard Carrier Generation System", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 41, No. 7, July 2006
- [148] Klaus Gravogl et al., "Choosing the best wireless protocol for typical applications", 2nd Workshop on Ultra-low Power Wireless Sensor Networks (WUPS 2011) February 2011, Como, Italy, <http://geodes.ict.tuwien.ac.at/PowerSavingHandbook/>
- [149] Z. Mammeri, "Réseaux sans fils Caractéristiques et principaux standards ", M1 Info Cours de Réseaux, IRIT, Université Paul Sabatier, Toulouse <http://www.irit.fr/~Zoubir.Mammeri/.../Chap6WLAN.pdf>
- [150] <http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBeeIP/Overview.aspx>
- [151] Reen-Cheng Wang et al., "Internetworking Between ZigBee/802.15.4 and IPv6/802.3 Network", *ACM 978-1-59593-790-2/07/0008, IPv6'07*, August 31, 2007, Kyoto, Japan
- [152] Bhavneet Sidhu et al., "Emerging Wireless Standards - Wi-Fi, ZigBee and Wi-Max", *World Academy of Science, Engineering and Technology* 25, 2007

- [153] Ghobad Heidari, "WiMedia UWB : Technology of Choice for Wireless USB and Bluetooth", Edition John Wiley & Sons Ltd, 2008
- [154] Ms. Dharmistha, D. Vishwakarma, "IEEE 802.15.4 and ZigBee : a Conceptual Study", International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, ISSN 22781021, Vol. 1, Issue 7, September 2012
- [155] Vaddina Prakash Rao, "The simulative Investigation of Zigbee/IEEE 802.15.4", Master Thesis of Science, Dresden University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Department of Electrical Engineering and Information Technology, Chair of Telecommunications, September, 2005
- [156] Jin-Shyan Lee, "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-Rate Wireless Personal Area Networks", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 52, No. 3, August 2006
- [157] "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks-Part 15.4 : Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)", IEEE Std 802.15.4™ 2011, (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006) IEEE Computer Society, New York, USA, 5 September 2011
- [158] Michèle Germain, "Wi-Max à l'usage des Communications Haut Débit", Forum Atena, lulu.com, Paris, 2009
- [159] Loutfi Nuaymi, "Wi-Max : Technology for Broadband Wireless Access", Wiley, 2007
- [160] Marwa Ibrahim et al., "Performance investigation of Wi-Max 802.16m in Mobile High Altitude Platforms", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol. 52, No.1, 10th June, 2013
- [161] Xavier Lagrange et al., "Réseaux GSM : des Principes à la Norme", Éditions Hermès Sciences, 2000
- [162] Timo Halonen et al., "GSM, GPRS Performance and EDGE, Evolution Towards 3G/UMTS", Second Edition, John Wiley & Sons Ltd 2003, ISBN 0-470-86694-2
- [163] Brahim Ghribi, Luigi Logrippo, "Understanding GPRS: the GSM Packet Radio Service", Elsevier Computer Networks 34 (2000), pp 763-779
- [164] Christian Bettstetter et al., "GSM Phase 2+General Packet Radio Service GPRS: Architecture, Protocols, and Air Interface", IEEE Communications Surveys, Third Quarter 1999, Vol. 2 No. 3, <http://www.comsoc.org/pubs/surveys>
- [165] Joseph Ho et al., "Throughput and Buffer Analysis for GSM General Packet Radio Service (GPRS)", Wireless Communications and Networking Conference New Orleans, LA, WCNC. 1999, IEEE, Vol. 3, Pages 1427-1431
- [166] Peter McGuiggan, "GPRS in Practice A Companion to the Specifications", John Wiley & Sons Ltd., 2004
- [167] John Park et al., "Practical Data Communications for Instrumentation and Control", Newnes An imprint of Elsevier, IDC Technologies, First published 2003, ISBN 07506 57979
- [168] Prakash C. Gupta, "Data Communications and Computer Networks ", PHI Learning, Prentice-Hall of India, 2006
- [169] Constantine A. Balanis, "Antenna Theory: Analysis and Design", 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley and Sons, Inc 1997
- [170] Rappaport T.S., "Wireless Communications Principles and Practice", 2<sup>nd</sup> Edition, Prentice Hall, 2001
- [171] Andreas F. Molisch, "Wireless Communications", John Wiley & Sons Ltd., Second Edition 2011, ISBN: 978-0-470-74187-0
- [172] Nitin Mittal et al., "Improved Leach Communication Protocol For WSN", NCCI 2010, National Conference on Computational Instrumentation CSIO Chandigarh, INDIA, 19-20 March, 2010

- [173] Simon Haykin, "Communication Systems", 4<sup>th</sup> Edition with Solutions Manual, John Wiley and Sons, Inc 2001
- [174] Proakis, J. G., "Digital Communications", 3<sup>rd</sup> ed., New York, McGraw-Hill, 1995
- [175] Sklar, B., "Digital Communications : Fundamentals and Applications", Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1988
- [176] "BlueCore2-External Product Data Sheet", Cambridge Silicon Radio, Cambridge, UK, Aug. 2006
- [177] "XS110 UWB Solution for Media-Rich Wireless Applications", Freescale, San Diego, CA, Dec. 2004
- [178] "CC2430 Preliminary Data Sheet (rev. 1.03)", Chipcon, Oslo, Norway, 2006
- [179] "Single-Chip WLAN Radio CX53111", Conexant, Newport Beach, CA, 2006
- [180] "SIM300 Hardware Specification", SIMCOM Ltd, 27<sup>th</sup> Dec 2005
- [181] "Wi-Max Transceiver 802.16-2004 AT86RF535A Preliminary Data Sheet", ATMEL, 2006
- [182] Kazem Sohraby et al., "Wireless Sensor Networks Technology, Protocols, and Applications", John Wiley & Sons, Inc. Edition 2007
- [183] Giovanni Gamba et al., "Performance Indicators for Wireless Industrial Communication Networks", 8th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems WFCS 2010
- [184] Meng-Shiuan Pan, Yu-Chee Tseng , "ZigBee Wireless Sensor Networks and Their Applications", Sensor Networks and Configuration, Springer, 2007, pp 349-368
- [185] Aditi Vutukuri, Saayan Bhattacharya et al., Networks and Communications (NetCom2013), Lecture Notes in Electrical Engineering 284, Proceedings of the Fifth International Conference on Networks and Communications, Springer International Publishing Switzerland, 2014, pp 21-29
- [186] François de Dieuleveult, Olivier Romain, "Électronique Appliquée aux Hautes Fréquences Principes et Applications", 2<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris 2008, ISBN 9782100537488
- [187] DR. Kamilo Feher, "Wireless Digital Communications (Modulation & Spread Spectrum Applications)", PHI Learning, Prentice Hall PTR, 1995
- [188] David K. Asano, Subbarayan Pasupathy, "Optimization of Coded GMSK Systems", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 48, No. 10, October 2002
- [189] Crepin Nsiala Nzeza, "Récepteur Adaptatif Multi-Standards pour les Signaux à Étalement de Spectre en Contexte Non Coopératif ", thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale, Juillet 2006
- [190] Richard D. Gitlin et al., "Data Communications Principles", Applications of Communications Theory, Springer, 1992
- [191] E. Shih, et al., "Physical Layer Driven Protocol and Algorithm Design for Energy-Efficient Wireless Sensor Networks", 7th Annual ACM SIGMOBILE Conference on Mobile Computing and Networking, Rome, 2001
- [192] "Guide of MATLAB" 7.8.0 (R2009a), www.mathworks.com
- [193] M. L. Sin, W. L. Soong and N. Ertugrul, "On-Line Condition Monitoring and Fault Diagnosis - a Survey", Australian Universities Power Engineering Conference, New Zealand, 2003
- [194] K. K. Pandey et al, "Review on Fault Diagnosis in Three-Phase Induction Motor", MEDHA-2012, Proceedings published by International Journal of Computer Applications (IJCA)
- [195] I. Ahmed et al., "A Baseline Study for On-Line Condition Monitoring of Induction Machines", Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 26-29 September 2004, Brisbane, Australia

- [196] Juha Tuominen, "Hydraulic Boom Monitoring With IEEE 802.11 Based Wireless Sensors Network", Master of Science Thesis, Tampere University of Technology, October 2009
- [197] **Saad Chakkor**, Baghoury Mostafa, Abderrahmane Hajraoui, "Performance Analysis of Faults Detection in Wind Turbine Generator Based on High-Resolution Frequency Estimation Methods", International Journal of Advanced Computer Science and Applications, SAI Publisher, Volume 5 No 4, May 2014, pp 139-148
- [198] "ZTE IX256 Wi-MAX MODEM-User Manual", ZTE Corporation, Aug. 2010, Version: V1.0
- [199] "SIM900 GSM/GPRS RS232 Modem-User Manual", Rhydo Technologies (P) Ltd, Dec.2011
- [200] "ENC28J60Data Sheet", Microchip Technology Inc. 2006, DS39662B
- [201] Jeremy Bentham, "TCP/IP Lean Web Servers for Embedded Systems", Second Edition, CMP Books Lawrence, Kansas 66046, Berkeley, California 2002
- [202] **Saad Chakkor**, Baghoury Mostafa, Abderrahmane Hajraoui, "On-line Wind Turbine Remote Monitoring and Fault Detection Based on Intelligent Device", International Electrical Engineering Journal (IEEJ), Vol.5 No.8, October 2014, pages 1495-1502
- [203] **Saad Chakkor**, Baghoury Mostafa, Abderrahmane Hajraoui, "Wind Turbine Fault Detection System in Real Time Remote Monitoring", IAES Journals, International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), Vol.4, No.6, December 2014, pages 1495-1502
- [204] **Saad Chakkor**, Baghoury Mostafa, Abderrahmane Hajraoui, "Real Time Remote Monitoring and Fault Detection in Wind Turbine", World Academy of Science, Engineering and Technology, International Scholarly and Scientific Research & Innovation, International Journal of Computer, Information, Systems and Control Engineering Vol.8, No.9, 2014, pages 1520-1527
- [205] **Saad Chakkor**, Baghoury Mostafa, Abderrahmane Hajraoui, "On-line Intelligent Embedded System for Remote Monitoring and Fault Diagnosis of Wind Turbine", Recent Advances in Electrical and Electronic Engineering Series 41, Proceedings of the 3rd International Conference on Circuits, Systems, Communications, Computers and Applications (CSCCA '14), Florence, Italy, November 22-24, 2014, pages 226-234
- [206] **Saad Chakkor**, Baghoury Mostafa, Abderrahmane Hajraoui, "Real Time and Wireless Smart Faults Detection Device for Wind Turbines", International Journal of Computer Science and Telecommunications IJCST, Vol.5, No.10, October 2014, pages 1-7
- [207] Zheng Lu, Hongji Yang, "Unlocking the Power of OPNET Modeler", Cambridge University Press, New York 2012
- [208] Adarshpal S. Sethi, Vasil Y. Hnatyshin, "The Practical OPNET® User Guide for Computer Network Simulation", Taylor & Francis Group, CRC Press 2013
- [209] "Help of Proteus ISIS 7.7", Labcenter Electronics, 2009
- [210] Martin Bates, "Interfacing PIC Microcontrollers", Embedded Design by Interactive Simulation, Elsevier, Newnes, Second edition 2014
- [211] Eduardo García Breijo, "Compilador C CCS y Simulador Proteus Para Microcontroladores PIC", MARCOMBO, Alfaomega Grupo Editor, Segunda edición 2009
- [212] S. Joe Qin, "Survey on Data-Driven Industrial Process Monitoring and Diagnosis" Elsevier Journal of Annual Reviews in Control, Volume 36, Issue 2, December 2012, pages 220-234
- [213] Shawn Sheng and Jon Keller et al., "Gearbox Reliability Collaborative Update", NREL U.S. Department of Energy, <http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/60141.pdf>
- [214] **Saad Chakkor**, Baghoury Mostafa, Abderrahmane Hajraoui, "ESPRIT Method Enhancement for Real-time Wind Turbine Fault Recognition", International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), IAES Publisher, Volume 5, No 4, April 2015

- [215] Fredric J. Harris, “Multirate Signal Processing for Communication Systems”, Prentice Hall, May 2004
- [216] P.M.J Van Den Hof, B. Wahlberg, S.Weiland, “System Identification (SYSID ‘03): a Proceedings Volume from the 13th IFAC Symposium on System Identification”, Rotterdam, the Netherlands, 27-29 August 2003, Vol.1, 1st Edition, Oxford Elsevier Science, Jun 2004
- [217] Joao Paulo C. L. da Costa et al, “Comparison of Model Order Selection Techniques For High-Resolution Parameter Estimation Algorithms”, 54th Internationales Wissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, Germany, 2009
- [218] Vladimir Golovko, Akira Imada, “Neural Networks and Artificial Intelligence”, Communications in Computer and Information Science 440, Proceedings of the 8th International Conference, ICNNAI 2014, Brest, Belarus, June 3-6, 2014, Springer 2014
- [219] George J. Klir, Bo Yuan, “Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Systems: Selected Papers by Lotfi Asker Zadeh”, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, Advances in Fuzzy Systems – Applications and Theory, Vol.6, Janv. 1996
- [220] J. Rissanen, “Modeling by Shortest Data Description”, Automatica, Vol. 14, 1978, pages 465-471
- [221] James C. Bezdek, Sanker K. PAL, “Fuzzy Models for Pattern Recognition”, IEEE Press, 1992
- [222] D. Dubois, H. Prade, “Fuzzy Sets and Systems : Theory and Applications”, Academic Press 1980, Mathematics in Sciences and Engineering vol. 144
- [223] Bernadette Bouchon-Meunier, “La Logique Floue et ses Applications”, Addison-Wesley, 1995
- [224] J. Yen, R. Langari, “Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information”, Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1999
- [225] Timothy J. Ross, “Fuzzy Logic with Engineering Applications”, Third Edition, John Wiley & Sons, Ltd. 2010
- [226] C. Lee, “Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Parts I and II, 1990; Vol. 20, pp 404-435
- [227] M. Sugeno, “An Introductory Survey of Fuzzy Control”, Information Sciences, , Prentice-Hall 1985, Vol. 36, pages 59-83
- [228] **Saad Chakkor**, Baghourri Mostafa, Abderrahmane Hajraoui, “Improved ESPRIT-TLS Algorithm for Wind Turbine Fault Discrimination”, Recent Advances on Electrosceince and Computers, Proceedings of the International Conference on Systems, Control, Signal Processing and Informatics (SCSI 2015), Barcelona, Spain April 7-9, 2015
- [229] Shuangwen Sheng and Yi Guo, “An Integrated Approach Using Condition Monitoring and Modeling to Investigate Wind Turbine Gearbox Design”, ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition Montréal, Canada June 15-19, 2015, National Renewable Energy Laboratory (NREL) Publications.
- [230] Shawn Sheng, “Improving Component Reliability Through Performance and Condition Monitoring Data Analysis”, NREL-Wind Farm Data Management & Analysis North America, March 25-26, 2015 Houston TX
- [231] F. van der Heijden et al., “Classification, Parameter Estimation and State Estimation an Engineering Approach using MATLAB”, John Wiley & Sons Ltd, 2004
- [232] M. Emre Celebi, “Partitional Clustering Algorithms”, Springer International Publishing Switzerland 2015
- [233] D. Vandevoorde, “A Fast Exponential Decomposition Algorithm and Its Applications to Structured Matrices”, PhD thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, USA, 1996
- [234] Dario Bini, Victor Pan, “Polynomial and Matrix Computations”, Vol. 1, Birkhäuser Boston Inc., Boston,

MA, 1994

- [235] Georg Heinig, Karla Rost, “Algebraic methods for Toeplitz-like matrices and operators”, Birkhäuser Verlag, Bâle, 1984
- [236] Albrecht Böttcher, Bernd Silbermann, “Introduction to Large Truncated Toeplitz Matrices”, Springer-Verlag, New York, 1999
- [237] John W. Layman, “The Hankel Transform and Some of Its Properties”, Journal of Integer Sequences, Vol.4, 2001

# Annexes

## I. Matrice de Toeplitz

En algèbre linéaire, une matrice de Toeplitz (d'après Otto Toeplitz) ou matrice à diagonales constantes est une matrice dont les coefficients sur une diagonale descendant de gauche à droite sont les mêmes. Par exemple, la matrice suivante est une matrice de Toeplitz [233-236] :

$$\begin{pmatrix} a & b & c & d & e \\ f & a & b & c & d \\ g & f & a & b & c \\ h & g & f & a & b \\ j & h & g & f & a \end{pmatrix} \quad (1)$$

### A. Définition

Toute matrice  $A$  à  $m$  lignes et  $n$  colonnes de la forme :

$$A = \begin{pmatrix} a_0 & a_{-1} & a_{-2} & \dots & \dots & a_{-n+1} \\ a_1 & a_0 & a_{-1} & \ddots & & \vdots \\ a_2 & a_1 & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & a_{-1} & a_{-2} \\ \vdots & & \ddots & a_1 & a_0 & a_{-1} \\ a_{m-1} & \dots & \dots & a_2 & a_1 & a_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

est une matrice de Toeplitz. Si l'élément situé à l'intersection des ligne  $i$  et colonne  $j$  de  $A$  est noté  $A_{i,j}$ , alors on a :

$$A_{i,j} = A_{i+1,j+1} = a_{i-j}. \quad (3)$$

### B. Propriétés

En général, une équation matricielle :

$$Ax = \vec{b} \quad (4)$$

Correspond à un système de  $n$  équations linéaires à résoudre. Si  $A$  est une matrice de Toeplitz, alors le système est particulier : il ne contient que  $2n-1$  informations arrangées d'une manière bien particulière au lieu de  $n^2$  dans le cas général. Cette propriété peut être établie en observant la matrice :

$$AU_n - U_nA \quad (5)$$

Ici  $U_n$  est donnée par :

$$U_n = \begin{pmatrix} 0 & \dots & 0 & 1 \\ 1 & 0 & & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Si on effectue la multiplication de  $U_n$  par un vecteur  $v$ , cela décale tous les coefficients de  $v$  d'une ligne vers le bas, et le dernier coefficient monte à la première ligne. Un calcul simple donne :

$$D(A) = AU_n - U_nA = \begin{pmatrix} (a_{-1} - a_{n-1}) & \cdots & (a_{-n+1} - a_1) & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & (a_1 - a_{-n+1}) \\ \vdots & \cdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & (a_{n-1} - a_{-1}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

On voit qu'elle est de rang au plus 2. On dira que  $D(A)$  est la matrice de déplacement de  $A$ . Si  $A$  est inversible et de Toeplitz, son inverse n'est pas de Toeplitz, sauf si  $A$  est triangulaire. Néanmoins, l'inverse de  $A$  a quand même une propriété intéressante : si on multiplie  $D(A)$  par l'inverse de  $A$ , on obtient  $-D(A^{-1})$ , qui est donc aussi de rang au plus 2.

Pour cette raison, si  $A$  est une matrice telle que  $AU_n - U_nA$  soit de rang  $r$ , on dira qu'elle est de type Toeplitz, de rang de déplacement  $r$ . Un couple  $(G, H)$  de matrices de taille  $n \times r$  telles que :

$$AU_n - U_nA = G^t H \quad (8)$$

est appelé générateur de déplacement pour la matrice  $A$ . Il fournit une façon compacte de représenter une matrice de type Toeplitz.

### C. Calcul avec des matrices de Toeplitz

Ces matrices sont très intéressantes du point de vue de la complexité du calcul. Par exemple, le produit d'une matrice de Toeplitz par un vecteur peut s'effectuer aussi rapidement que le produit de deux polynômes de degrés au plus  $n-1$  et  $2n-2$ , c'est-à-dire en  $O(n \log n)$  opérations.

La somme de deux matrices de Toeplitz est de Toeplitz, et peut être effectuée en  $O(n)$  opérations. Le produit de deux matrices de Toeplitz n'est pas de Toeplitz, mais il est cependant de type Toeplitz. En représentation par générateurs de déplacement, leur produit peut se calculer en  $O(n \log n)$  opérations.

Pour la résolution d'un système linéaire dont la matrice est de Toeplitz, intervenant par exemple pour le calcul des coefficients d'un modèle autorégressif pour une série temporelle, l'algorithme de *Levinson-Durbin* (complexité :  $O(n^2)$ ) est souvent employé. Pour des  $n$  grands, la résolution de tels systèmes peut être rendu très rapide - typiquement en  $O(n \log(n)^2)$  opérations, au moyen de la conjonction de plusieurs procédés algorithmiques. Ces procédés s'étendent aux matrices de type Toeplitz, et ils sont intéressants pour une matrice de rang de déplacement  $r$  petit devant  $n$ , car ils fournissent des algorithmes en  $O(nr^2 \log(n)^2)$  opérations, à comparer avec  $O(n^3)$  opérations pour une matrice pleine quelconque.

Cependant, une matrice de Toeplitz peut être fort mal conditionnée, et donc la solution obtenue avec une erreur relative forte si on calcule en nombres flottants, ou avec des fractions gigantesques, si on calcule exactement en rationnels. Ces matrices sont aussi étroitement liées aux séries de Fourier car l'opérateur

de multiplication (en) par un polynôme trigonométrique, comprimé (restreint) à un espace de dimension finie, peut être représentée par une telle matrice.

Si une matrice de Toeplitz vérifie de plus  $a_i = a_{i+n}$ , alors c'est une matrice circulante.

## II. Matrice de Hankel

En algèbre linéaire, une matrice de Hankel, du nom du mathématicien Hermann Hankel, est une matrice carrée dont les valeurs sont constantes le long des diagonales ascendantes, c'est-à-dire dont les indices vérifient la relation [237] :

$$a_{i,j} = a_{i-1,j+1} \quad (1)$$

Par exemple une matrice de Hankel de taille 5 s'écrit sous la forme :

$$\begin{pmatrix} a & b & c & d & e \\ b & c & d & e & f \\ c & d & e & f & g \\ d & e & f & g & h \\ e & f & g & h & i \end{pmatrix} \quad (2)$$

Les matrices de Toeplitz ont, elles, des valeurs constantes sur les diagonales descendantes. Sur un espace de Hilbert muni d'une base Hilbertienne, on peut définir plus généralement un opérateur de Hankel. Ce dernier admet pour représentation une matrice de Hankel infinie, c'est-à-dire que le coefficient  $a_{i,j} = (e_i | a(e_j))$ , dépend seulement de  $i+j$ .

## III. Capteurs d'une éolienne

Manuel électrique, Capteurs ambiants réf. 941870 R4, éoliennes Vestas, 2000

	Capteurs ambiants		
Date : 31 mai 2000	Classe : 2	Réf. : 941870.R4	Page : 165 / 7

# Capteurs ambiants

### 1. Girouette

La girouette et l'anémomètre se trouvent sur l'arrière d'un support sur la coque en fibres de verre de la nacelle.

2 capteurs optiques sont montés dans la girouette. B302 s'appelle capteur 0° (capteur zéro degré) et B303 capteur 90°.

Le principe est basé sur le mouvement d'un écran semi-circulaire provoqué par la girouette. Le signal du capteur optique est haut quand le capteur **n'est pas** protégé par l'écran. Inversement, le signal du capteur optique est bas quand le capteur est protégé par l'écran. Voir figure 1.

Un signal haut constant ==> pourcentage d'assombrissement = 0 %.

Un signal haut et bas 50-50 ==> pourcentage d'assombrissement = 50 %.

Un signal bas constant ==> pourcentage d'assombrissement = 100 %.

Si le pourcentage d'assombrissement est 0 % pour le capteur 0°, l'éolienne doit être orientée dans le sens A-H (anti-horaire) pour revenir au vent. Si le pourcentage d'assombrissement est de 100 %, l'éolienne doit être orientée dans le sens H (horaire) pour revenir dans le vent.

La girouette oscille dans le vent et lorsque l'éolienne est face au vent, le signal du capteur 0° est haut 50% du temps et bas 50% du temps, ce qui résulte en un pourcentage d'assombrissement de 50 % et le capteur 90° est haut tout le temps, ce qui donne un assombrissement de 0 %.

Le signal du capteur 0° est filtré par un filtre de moyenne exponentielle avec une constante de temps de 100 s. Un exemple d'utilisation de ce filtre est donné plus bas à la figure 2, dans lequel le signal du capteur 0° varie continuellement entre un pourcentage d'assombrissement de 0 et de 100 % et au bout de 696 s devient constant à 100% ; le signal réel et le signal filtré sont tous deux illustrés.

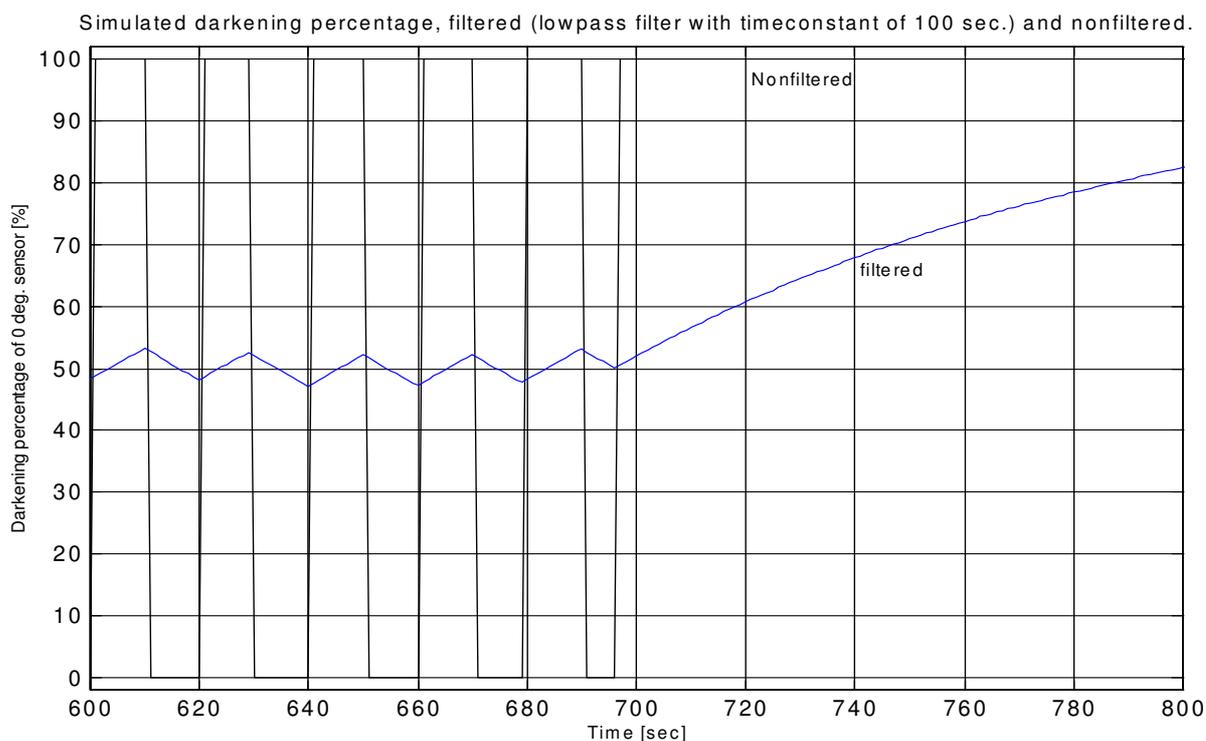


Figure 1

Si le pourcentage d'assombrissement filtré est  $> 50\% + \text{limite d'orientation (10\%)}$  ou  $< 50\% - \text{limite d'orientation (10\%)}$ , l'éolienne s'oriente de 5 s ( $\cong 2,5^\circ$ ) dans le sens horaire ou anti-horaire en fonction du pourcentage d'assombrissement. Quand l'éolienne commence à s'orienter le pourcentage d'assombrissement calculé est fixé par l'ordinateur à  $50\% + \text{limite d'orientation}$  ou  $50\% - \text{limite d'orientation}$ . Si le pourcentage d'assombrissement  $< 50\% - \text{limite d'orientation}$  ou  $> 50\% + \text{limite d'orientation}$  lorsque l'éolienne est en cours d'orientation, l'orientation se poursuit.

Si % d'assombrissement  $< 50\% - \text{limite d'orientation} \Rightarrow$  orientation A-H.

Si % d'assombrissement  $> 50\% + \text{limite d'orientation} \Rightarrow$  orientation H.

Dans l'exemple de la figure 1, le signal du capteur 0° devient constant au bout de 696 s (assombrissement 100% ) ; quand cela se produit, le signal filtré a un pourcentage d'assombrissement de 50%. Environ 22 s plus tard, le signal filtré a un pourcentage d'assombrissement de 60% et l'éolienne commence à s'orienter. Il est très théorique de dire que le signal non filtré fluctue entre un assombrissement de 0% et de 100 % parce que le signal provient du module CT-3218 dans lequel le signal réel des capteurs est calculé par un pourcentage d'assombrissement toutes les secondes.

## 2. Anémomètre

La vitesse du vent est mesurée par l'anémomètre. L'anémomètre donne un signal tachymétrique avec une fréquence proportionnelle à la vitesse du vent.

Pendant 1 s, le nombre de flancs avant est compté et calculé par l'ordinateur pour avoir une expression de la fréquence. La vitesse du vent est calculée au moyen de deux paramètres (BASE et PENTE), voir l'expression ci-dessous.

$$\text{Vitesse du vent} = \text{Pente} \times \text{fréquence} + \text{Base [m/s]}$$

Où

$$\text{Pente} = (\text{P4.1})/1000$$
$$\text{Base} = (\text{P4.2})/10$$

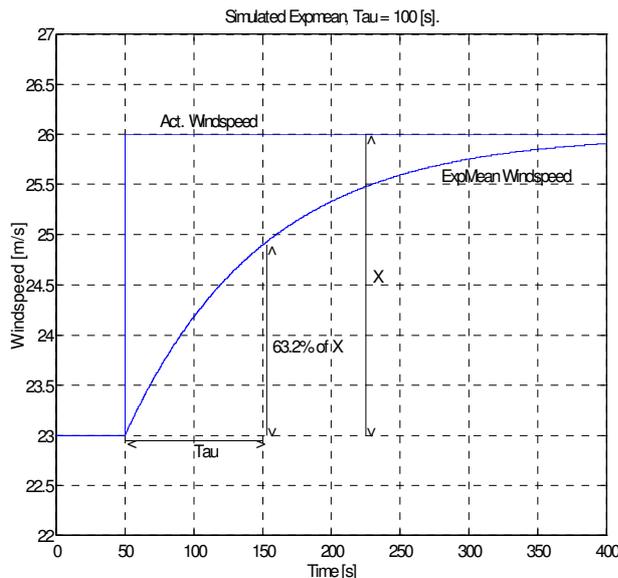


Figure 2

Au cours de la surveillance de l'éolienne, la vitesse du vent est une moyenne exponentielle de la vitesse du vent de l'anémomètre (filtre passe-bas avec une constante de temps de 100 s, tout comme le filtre décrit à la section précédente). Si la vitesse du vent est supérieure à 30 m/s pour la V39, 25 m/s pour la V42 et 20 m/s pour la V44, l'ordinateur met l'éolienne en PAUSE. Un palier de vent passant de 23 m/s à 26 m/s donne la réponse illustrée sur le tracé. La moyenne exponentielle est sur 63 % du palier au bout d'une constante de temps ( $\cong 25$  m/s). Si c'est le cas pour une V42, l'ordinateur arrête l'éolienne.

## 3. Surveillance de la température de l'ordinateur

Pour permettre un traitement correct des données dans l'ordinateur, la température doit être supérieure à 0°C. Une résistance chauffante est donc incorporée dans le contrôleur haut et dans le contrôleur au sol. Dans le contrôleur haut et le contrôleur au sol, le chauffage veille à ce que la température soit supérieure à 0°C, dans des conditions ambiantes descendant à -20°C.

La surveillance de la température de l'ordinateur est particulièrement nécessaire si la température dans les environs est au-dessous de 0°C et en cas de coupure de courant. Les résistances chauffantes ne peuvent pas alors maintenir la température au-dessus de 0°C. Dans ce cas l'éolienne ne peut pas démarrer tant que la température dans le contrôleur haut et celui au sol n'est pas supérieure à 0°C.

Si la température dans le contrôleur haut dépasse 0°C, le capteur de température B304 concerné se ferme et le relais D304 active S304 (entrée du processeur haut). Si la température du contrôleur au sol dépasse également 0°C, le capteur de température concerné B305 se ferme et le relais ferme le contact D305 qui active S305 (entrée du contrôleur au sol).

Quand la température est inférieure à 0°C et qu'un capteur de température (B304 ou B305) est désactivé, K330 a un retard de 60 s avant de couper l'alimentation de l'ordinateur. Au cours de ces 60 s l'ordinateur a le temps de passer à l'état PAUSE. Quand B304 est désactivé, le relais D304 désactive S304 (entrée du processeur haut), et quand B305 est désactivé, le relais D305 désactive S305 (entrée du processeur au sol).

Comme il y a une régulation des températures basses, il y a également une régulation des températures hautes. La température dans le contrôleur haut est mesurée par un capteur PT100 (R310). Quand elle est supérieure à 35°C (P4.64 TopTemp TopFan start – temp. haute dém. ventil. haut), l'ordinateur active le contacteur K315 qui met en marche le ventilateur (E953) du contrôleur haut. Quand la température est de

5°C (P4.65 TopTemp TopFan hyst. – temp. haute hyst. ventil. haut) au-dessous de la température donnée dans P4.64 l'ordinateur désactive le contacteur et le ventilateur s'arrête.

La température dans la section de jeu de barres est contrôlée par les thermistances (S309 et S311). Quand la température est supérieure à 40°C, la thermistance S309 se met à l'état "bas" et l'ordinateur active le contacteur K312 qui met en marche les ventilateurs (E946A et E946B) dans la section jeu de barres. Quand la température repasse au-dessous de 40°C, la thermistance S309 passe à l'état "haut" et l'ordinateur désactive le contacteur K312 et arrête les ventilateurs si et **seulement** si la puissance moyenne produite est 90% de la puissance moyenne produite la dernière fois que la thermistance S309 était à l'état "bas".

Si la température dans la section jeu de barres est au-dessus d'environ 70°C, la thermistance S311 passe à l'état "bas" et l'ordinateur met l'éolienne à l'état PAUSE.

#### **4. Résistance chauffante**

Une résistance chauffante 400W, 230V est placée dans le contrôleur haut et dans le contrôleur au sol (E941 et E939). Les résistances chauffantes sont commandées par une unité PTS 5, dont l'une est dans la section processeur du contrôleur haut (E942) et l'autre dans le contrôleur au sol (E940).

L'unité PTS 5 fonctionne ainsi :

Quand la température est inférieure à 2°C, la résistance chauffante produit une puissance maximale constante. Si la température est comprise entre 2°C et 10°C, la puissance de la résistance chauffante est régulée. L'unité PTS 5 maintient la résistance chauffante désactivée pendant un temps plus ou moins long au sein d'une période de 2 s. Quand la température est supérieure à 10°C, la résistance chauffante est toujours désactivée.

#### **5. Capteur de température dans la nacelle et de température ambiante**

Le capteur de température dans la nacelle (R306) est monté au-dessous au contrôleur haut. La température de la nacelle sert à mettre en marche et à arrêter le refroidisseur d'huile d'engrenage.

Le ventilateur (M340) du refroidisseur d'huile d'engrenage démarre à basse vitesse quand la température de la nacelle est supérieure à 35°C (P4.48 NacTemp NacFan Low - temp nac ventil. nac basse) et s'arrête quand la température passe au-dessous de 30°C (P4.48 NacTemp NacFan Low - P4.50 NacTemp Nacfan hyst. (temp nac ventil. nac hyst)). Le ventilateur (M340) démarre à grande vitesse quand la température de la nacelle est supérieure à 40°C (P4.49 NacTemp Nacfan High - temp nac ventil. nac haute) et passe en basse vitesse quand la température redevient inférieure à 35°C (P4.49 NacTemp Nacfan High - P4.50 NacTemp Nacfan hyst. (temp nac hyst. ventil. nac)).

NB : Le refroidisseur d'huile d'engrenage est contrôlé par la température de la nacelle et la température de l'huile d'engrenage. Il marche toujours en fonction de la demande la plus élevée de l'une ou l'autre des températures.

Le capteur de température ambiante (R300) est monté au-dessous de la nacelle. Si la température est inférieure à -20°C pendant plus de 20 s, l'ordinateur met l'éolienne à l'état PAUSE.

## 6. Capteur de température PT-100

Temp. [°C]	R [ohm]	Temp. [°C]	R [ohm]
-20	92,2	+70	127,1
-10	96,1	+80	130,9
0	100,0	+90	134,7
+10	103,9	+100	138,5
+20	107,8	+110	142,3
+30	111,7	+120	146,1
+40	115,5	+130	149,8
+50	119,4	+140	153,6
+60	123,2	+150	157,3

Augmentation : 0,38 ohm/°C

## 7. Calcul de moyenne exponentielle

Le calcul de moyenne exponentielle sert à la fois à déterminer le pourcentage d'assombrissement (voir section 1) et la vitesse d'arrêt (voir section 2). Le calcul de moyenne exponentielle s'effectue de la manière suivante :

$$y(n) = x(n) \cdot (1 - K_{ATT}/100) + y(n-1) \cdot (K_{ATT}/100)$$

Où,  $y(n)$  = Sortie filtrée de l'échantillon no. n  
 $x(n)$  = Entrée filtrée de l'échantillon no. n  
 $K_{ATT}$  = Coefficient d'amortissement exponentiel en %.

En rapport avec le calcul de moyenne exponentielle, Vestas utilise la constante de temps ( $\tau$ ) au lieu du coefficient d'amortissement. Il est possible d'exprimer  $\tau$  en fonction de  $K_{ATT}$  quand le temps d'échantillonnage est  $T_s$  de la manière suivante :

$$\tau = -T_s / \ln(K_{ATT}/100) \implies K_{ATT} = 100 \cdot e^{-(T_s/\tau)}$$

Quand  $\tau = 100s$  et que le temps d'échantillonnage  $T_s = 1s$ , le filtre de calcul de moyenne exponentielle s'exprime ainsi :

$$y(n) = 0,01 \cdot x(n) + 0,99 \cdot y(n-1)$$

qui est également un filtre passe-bas. Cette expression est identique à celle qui est utilisée pour déterminer le pourcentage d'assombrissement et la vitesse d'arrêt.

## 8. Régulation de la température

L'éolienne est dotée d'une régulation de température ajustant la puissance active si la génératrice ou le multiplicateur de vitesse fonctionne à une température trop élevée.

### a) Régulation de la température de la génératrice

La régulation de température de la génératrice est activée si la température ambiante est inférieure de (P4.31) 5 °C à la température limite supérieure ambiante (P4.13) 40°C, ou si la tension de réseau est de (P4.30) -15% au-dessus de la tension nominale (P1.128).

Quand le contrôleur est activé, un régulateur PI contrôle la puissance limite si la température de la génératrice dépasse la limite d'alarme (P5.21) °C moins (P4.29) 10 °C.

Dans le même temps le message "Hot Generator \_\_\_\_°C \_\_\_\_\_kW" (haute température génératrice\_°C\_kW) est consigné dans le journal des événements toutes les (P4.46) 1800 s (toutes les 30 min).

Puisque la limite de tension est réglée à -15% le contrôleur est toujours activé.

### b) Régulation de la température de l'engrenage

La régulation de température de l'engrenage est activée si la température ambiante est inférieure de (P4.36) 5 °C à la température limite supérieure ambiante (P4.13) 40°C.

Quand le contrôleur est activé, un régulateur PI contrôle la puissance limite si la température de l'engrenage dépasse la limite d'alarme (P5.18) °C moins (P4.35) 5 °C.

Dans le même temps le message "Hot gear \_\_\_\_°C \_\_\_\_\_kW" (haute température engrenage\_°C\_kW) est consigné dans le journal des événements toutes les (P4.46) 1800 s (toutes les 30 min).

### c) Liste des capteurs utilisés

Contrôleur VMP-500/600/660kW-(690V-50Hz / 60Hz), Application : Réseau

N° comp.	Réf.	Description	Type	Fournisseur	Commentaire
S102-S105	091180	Capteur de torsion de câble, 3693 S1825	X/2FR6/150-091170 TER	DEMEX Electric	Z = 10, M = 12
S200	109090	Capteur de niveau d'huile hydraulique	Gems LS600-150-NO-10	Berendsen PMC A/S	Pos. 2
S201	-----	Pressostat, filtre		Berendsen PMC A/S	Pos. 10
S202	109155	Pressostat, réservoir de frein	Hydropa DS302/F-55/SS	Berendsen PMC A/S	Pos. 26.1
A203		Transducteur de pression analogique hyd.	Danfoss MBS 33 0606301800	Berendsen PMC A/S	Pos. 12
R206	109102	Capteurs Pt-100, huile hydraulique	½" RG, L = 200 mm	Berendsen PMC A/S	Pos. 4
R300	114279	Capteur de température ambiante	Pt100	Micro Matic	
B301	872300	Anémomètre		Vestas	
B302-B303	835783	Girouette		Vestas	
B304	114219	Thermostat, contrôleur haut 0°C	EBERLE type 6704	J. D. Fridrichen	0°C
R306	114279	Capteur de température, nacelle	Pt100	Micro Matic	
R310	114279	Capteur de température, contrôleur du haut	PT100	Micro Matic	
B400	114252	Capteur inductif, rotor	EI 30 10 PPos, PNP	Carlo Gavazzi	
B401	114264	Capteur inductif, génératrice	DU 10, EP, PNP	Carlo Gavazzi	Forme en fourche
R402	-----	Capteur de température, engrenage		Flender	
S403	114855	Capteur de vibration	WLNJ-S2-G	OMRON	
U405	791275 095355	Protection Vestas contre les survitesses Protection Vestas contre les survitesses	VOG CT279	Vestas Cotas	Introduit en 1997
R406	-----	Capteur de température, roulement d'engrenage	PT100	-----	
S412	131028	Pressostat, refroidissement d'huile d'engrenage	KPS-31 1/4"	Danfoss	
B430	114252	Capteur inductif, VOG	EI 30 10 PPos, PNP	Carlo Gavazzi	
R503	-----	Température génératrice 1	Pt-100	-----	
R504	-----	Température génératrice 2	Pt-100	-----	Gén. 2
R963	114289	Capteur de température sur E940	NTC 4,7kΩ-A25	Promax	
R964	114289	Capteur de température sur E942	NTC 4,7kΩ-A25	Promax	

# IV. Schémas des circuits électroniques du module IESRCM

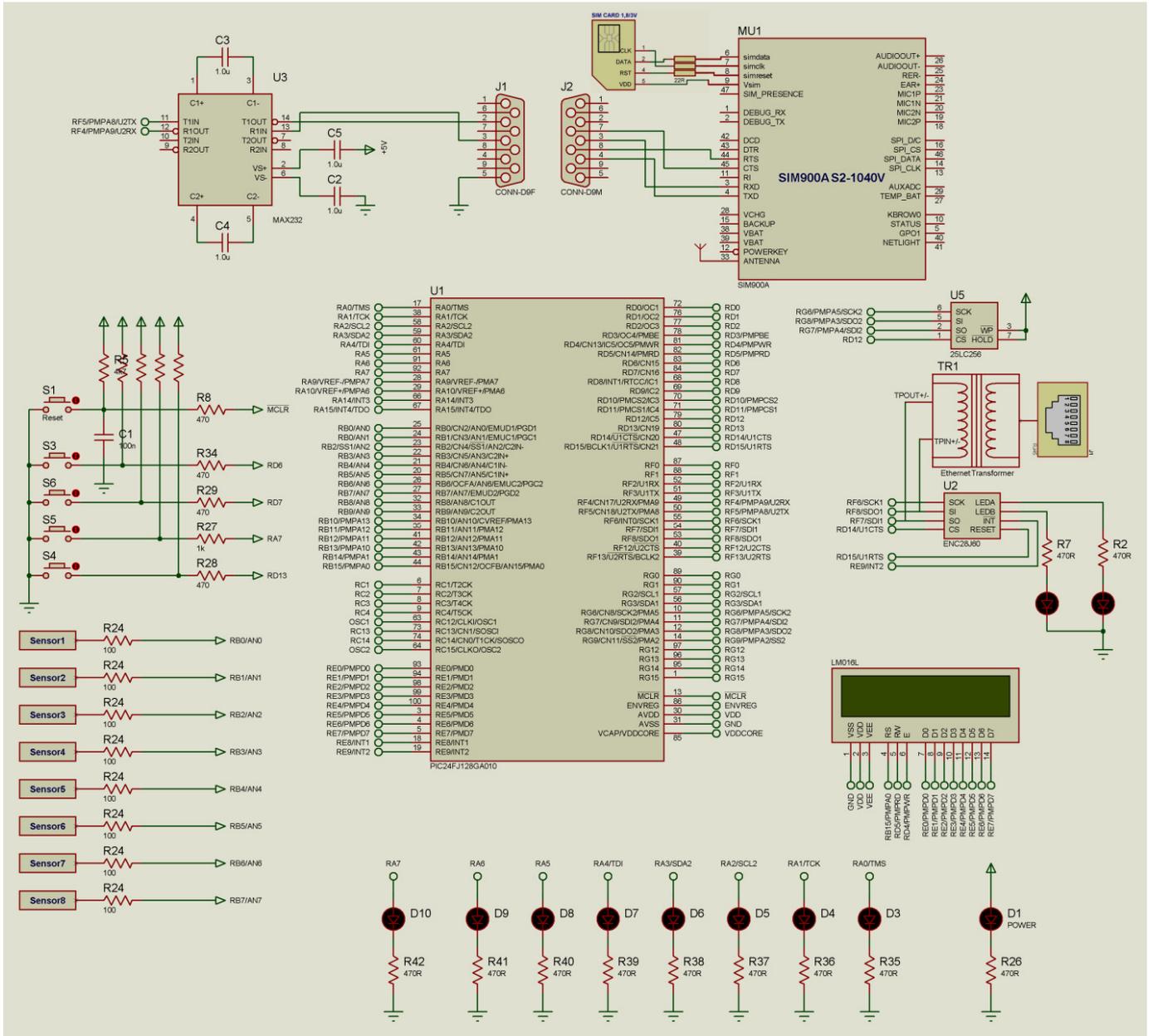


Figure 1. Schéma électronique du système IESRCM avec GPRS

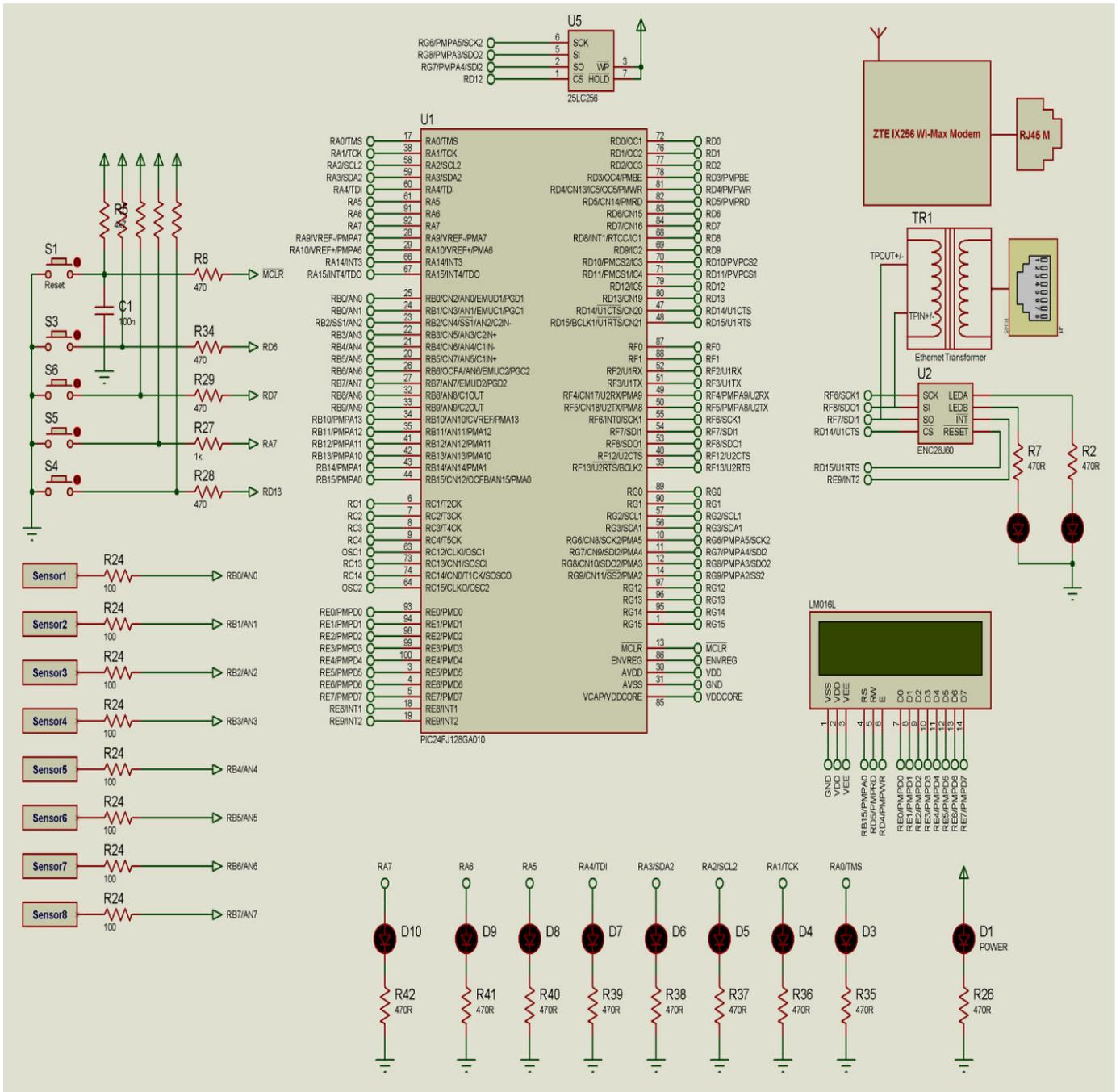


Figure 2. Schéma électronique du système IESCRM avec Wi-Max



# PIC24FJ128GA010 FAMILY

## 64/80/100-Pin, General Purpose, 16-Bit Flash Microcontrollers

### High-Performance CPU:

- Modified Harvard Architecture
- Up to 16 MIPS Operation @ 32 MHz
- 8 MHz Internal Oscillator with 4x PLL Option and Multiple Divide Options
- 17-Bit x 17-Bit Single-Cycle Hardware Multiplier
- 32-Bit by 16-Bit Hardware Divider
- 16 x 16-Bit Working Register Array
- C Compiler Optimized Instruction Set Architecture:
  - 76 base instructions
  - Flexible addressing modes
- Two Address Generation Units for Separate Read and Write Addressing of Data Memory

### Special Microcontroller Features:

- Operating Voltage Range of 2.0V to 3.6V
- Flash Program Memory:
  - 1000 erase/write cycles
  - 20-year data retention minimum
- Self-Reprogrammable under Software Control
- Selectable Power Management modes:
  - Sleep, Idle and Alternate Clock modes
- Fail-Safe Clock Monitor Operation:
  - Detects clock failure and switches to on-chip, low-power RC oscillator
- On-Chip 2.5V Regulator
- JTAG Boundary Scan and Programming Support
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with On-Chip, Low-Power RC Oscillator for Reliable Operation
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) and In-Circuit Emulation (ICE) via 2 Pins

### Analog Features:

- 10-Bit, Up to 16-Channel Analog-to-Digital Converter
  - 500 ksp/s conversion rate
  - Conversion available during Sleep and Idle
- Dual Analog Comparators with Programmable Input/Output Configuration

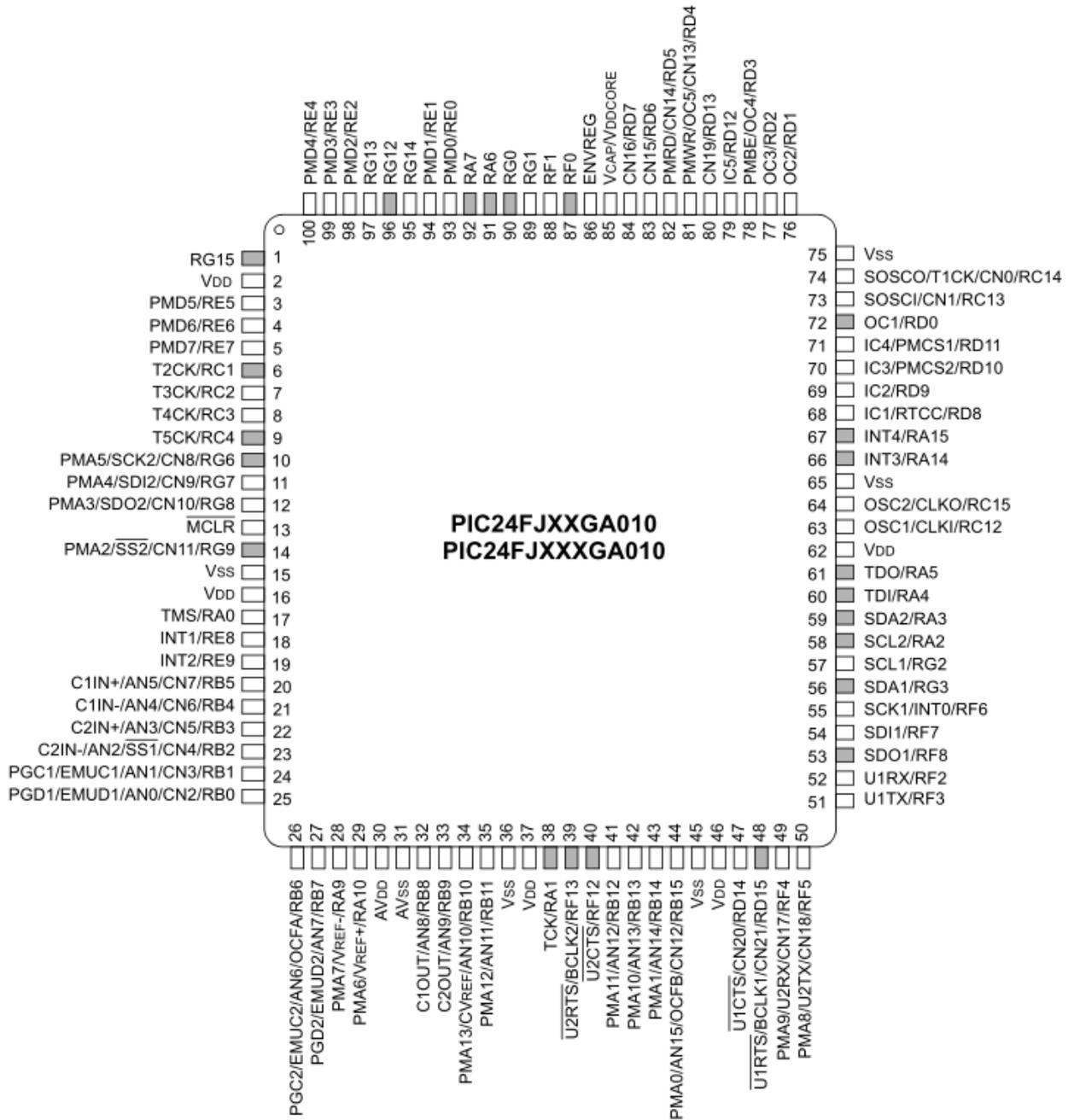
### Peripheral Features:

- Two 3-Wire/4-Wire SPI modules, Supporting 4 Frame modes with 8-Level FIFO Buffer
- Two I<sup>2</sup>C™ modules Support Multi-Master/Slave mode and 7-Bit/10-Bit Addressing
- Two UART modules:
  - Supports RS-232, RS-485 and LIN/J2602
  - On-chip hardware encoder/decoder for IrDA®
  - Auto-wake-up on Start bit
  - Auto-Baud Detect
  - 4-level FIFO buffer
- Parallel Master Slave Port (PMP/PSP):
  - Supports 8-bit or 16-bit data
  - Supports 16 address lines
- Hardware Real-Time Clock/Calendar (RTCC):
  - Provides clock, calendar and alarm functions
- Programmable Cyclic Redundancy Check (CRC)
  - User-programmable polynomial
  - 8/16-level FIFO buffer
- Five 16-Bit Timers/Counters with Programmable Prescaler
- Five 16-Bit Capture Inputs
- Five 16-Bit Compare/PWM Outputs
- High-Current Sink/Source (18 mA/18 mA) on All I/O Pins
- Configurable, Open-Drain Output on Digital I/O Pins
- Up to 5 External Interrupt Sources
- 5.5V Tolerant Input (digital pins only)

Device	Pins	Program Memory (Bytes)	SRAM (Bytes)	Timers 16-Bit	Capture Input	Compare/PWM Output	UART	SPI	I <sup>2</sup> C™	10-Bit A/D (ch)	Comparators	PMP/PSP	JTAG
PIC24FJ64GA006	64	64K	8K	5	5	5	2	2	2	16	2	Y	Y
PIC24FJ96GA006	64	96K	8K	5	5	5	2	2	2	16	2	Y	Y
PIC24FJ128GA006	64	128K	8K	5	5	5	2	2	2	16	2	Y	Y
PIC24FJ64GA008	80	64K	8K	5	5	5	2	2	2	16	2	Y	Y
PIC24FJ96GA008	80	96K	8K	5	5	5	2	2	2	16	2	Y	Y
PIC24FJ128GA008	80	128K	8K	5	5	5	2	2	2	16	2	Y	Y
PIC24FJ64GA010	100	64K	8K	5	5	5	2	2	2	16	2	Y	Y
PIC24FJ96GA010	100	96K	8K	5	5	5	2	2	2	16	2	Y	Y
PIC24FJ128GA010	100	128K	8K	5	5	5	2	2	2	16	2	Y	Y

# Pin Diagrams (Continued)

## 100-Pin TQFP



**Legend:** Shaded pins indicate pins that are tolerant to up to +5.5 VDC.

PIC24FJ128GA Family Data Sheet-General Purpose, 16-Bit Flash Microcontrollers, DS39747C, 2006, fiche disponible sur le site web :

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39747C.pdf>

## VI. Notions de base de la logique floue

Pour un système de diagnostic flou, les signaux de ses entrées, utilisés en surveillance d'état peuvent être associés à certaines fonctions d'appartenance ou de vraisemblance. Une fonction d'appartenance permet à une valeur donnée, d'être associée à une variable linguistique avec un certain degré de vérité ou de validité. Une variable linguistique n'est en réalité qu'une expression de langage courant [219, 221-227]. Différentes formes de fonctions d'appartenance peuvent être choisies pour une application donnée. La construction de ces fonctions d'appartenance nécessite un aperçu significatif au sens physique des signaux et des variables linguistiques à utiliser. Elle nécessite aussi de l'expérience pratique. Une fonction d'appartenance  $\mu$  est une fonction caractéristique de valeur contenue dans l'intervalle  $[0, 1]$ . Elle fait correspondre à chaque valeur possible de toute variable ou signal d'entrée de l'ensemble flou, un degré d'appartenance : c'est l'opération de 'fuzzification'. Elle permet de passer du domaine réel au domaine du flou. Plusieurs ensembles flous peuvent donc être définis sur la même variable. Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance. Un point  $x$  de l'univers flou, appartient à un ensemble  $A$ , avec le degré d'appartenance suivant :

$$0 \leq \mu_A(x) \leq 1 \quad (1)$$

Le Support d'un ensemble flou est l'ensemble des points pour lesquels le degré d'appartenance est non nul :

$$S_A = \{x \mid \mu_A(x) > 0\} \quad (2)$$

Par exemple, la variable amplitude d'harmonique peut avoir trois ensembles flous. Ils sont associés à leurs termes linguistiques : amplitude petite, moyenne et grande, comme illustré sur la figure 1.

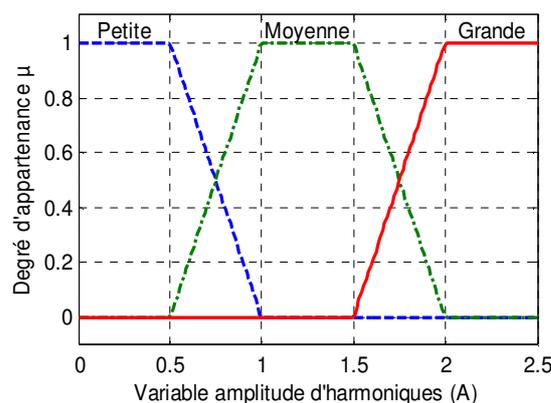


Figure 1. Fonctions d'appartenance linéaires et termes linguistiques

Ainsi, l'ensemble flou des amplitudes d'harmoniques sera défini par une «fonction d'appartenance  $\mu$ ». Elle peut prendre n'importe quelle valeur (degré d'appartenance) dans l'intervalle  $[0, 1]$  pour les harmoniques ayant une amplitude dans l'intervalle  $[0,5A, 2A]$  comme schématisé sur la figure 2.

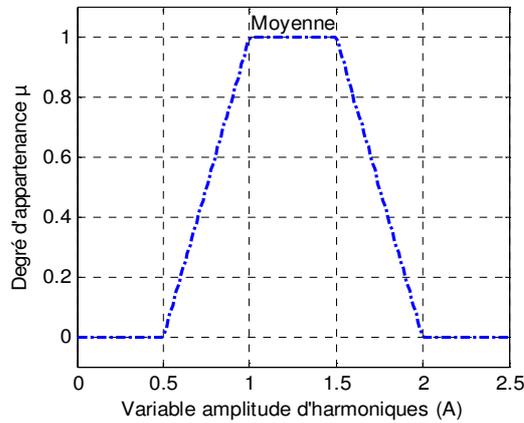


Figure 2. Fonction d'appartenance de la variable amplitude moyenne

Comme dans la logique booléenne, les opérations de base de la logique floue pourraient inclure «ET», «OU» et «NON». Mais au lieu d'avoir un résultat «Vrai» ou «Faux», les opérateurs de logique floue permettent une valeur de degré comprise entre 0 et 1. Pour ce degré, l'état combiné de l'opération logique est vrai.

### A. Intersection

L'opérateur logique ET correspond à l'intersection des ensembles flous. Le degré de vérité de la proposition «A ET B» est le minimum des degrés de vérité de A et de B:

$$\mu(A \text{ ET } B) = \text{MIN}(\mu(A), \mu(B)) \quad (3)$$

#### Exemple :

A=«Amplitude moyenne» est vraie à 0.7

B=«Vibration faible» est vraie à 0.4

$$\mu(A \text{ ET } B) = \text{MIN}(\mu_A, \mu_B) = \text{MIN}(0.7, 0.4) = 0.4$$

### B. Union

L'opérateur logique OU correspond à l'union des ensembles flous. Le degré de vérité de la proposition «A OU B» est le maximum des degrés de vérité de A et de B:

$$\mu(A \text{ OU } B) = \text{MAX}(\mu(A), \mu(B)) \quad (4)$$

#### Exemple :

A=«Amplitude moyenne» est vraie à 0.7

B=«Vibration faible» est vraie à 0.4

$$\mu(A \text{ OU } B) = \text{MAX}(\mu_A, \mu_B) = \text{MAX}(0.7, 0.4) = 0.7$$

### C. Complément

L'opérateur logique relatif au complément d'un ensemble flou est la négation. Il est exprimé comme suit :

$$\mu(\text{NON}(A)) = 1 - \mu(A) \quad (5)$$

**Exemple :**

C=«NON Amplitude moyenne»

C= NON(A)

$\mu(C) = \mu(\text{NON}(A)) = 1 - \mu_A = 1 - 0.7 = 0.3$

**D. Inférence**

Le mécanisme d'inférence représente une simplification basée sur l'implication floue qui utilise les bases de règles floues.

**E. Conclusion**

La logique floue est une combinaison de relations ou de propositions du prédicat liées par l'opérateur de conjonction «ET» et l'opérateur de dis conjonction «OU».

**F. Règles floues et moteur d'inférence**

L'outil le plus adopté dans les applications s'appuyant sur des algorithmes de diagnostic flous, est la base des règles floues.

Ces dernières dérivent d'une base de connaissance issue de l'expertise humaine. Elles sont utilisées en parallèle ou en série. Chaque règle est de type :

$$\text{SI « Condition » ALORS « Conclusion »} \quad (6)$$