

---

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1**

**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**

**THÈSE**

**Présenté au Département d'électrotechnique**

**Pour l'obtention du diplôme de**

**DOCTORAT**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière: Electrotechnique**

**Option: Réseaux électrique et  
Haute tension**

**Par**

**RAHMANI Alaa eddine**

**THÈME**

*Contribution à l'Application de l'analyse par  
ondelettes dans les réseaux électriques*

**Soutenue le 24/02/2022 devant le Jury:**

<b>GHERBI Ahmed</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Ferhat Abbas Sétif 1</b>	<b>Président</b>
<b>SLIMANI Linda</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Ferhat Abbas Sétif 1</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>AGGOUNE Lakhdar</b>	<b>MCA</b>	<b>Univ. Ferhat Abbas Sétif 1</b>	<b>Examineur</b>
<b>DIB Djalel</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Larbi Tebessi - Tébessa</b>	<b>Examineur</b>
<b>LABAR Hocine</b>	<b>Professeur</b>	<b>Univ. Badji Mokhtar- Annaba</b>	<b>Examineur</b>

---

## Dédicaces

---

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de  
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail.*

*Je dédie ce modeste travail : A ma mère et mon père*

*A ma femme et ma petite fille*

*A mes très chers frères et ma sœur.*

*A toute ma famille*

*A mes chers amis*

*A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*

*A tous ceux qui connaissent Alaa eddine RAHMAN.*

*A tous les amis d'études surtout ceux D'électrotechnique.*

---

## *Remerciements*

---

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l'accomplissement de cette thèse.

Je remercie, en deuxième position, ma chère mère, mon père, ma femme et ma petite fille LAYEN sans laquelle je n'aurai jamais pu arriver à terme dans la rédaction, et qui m'ont toujours entouré d'affection et de soutien dans les moments pénibles comme dans les moments de joie.

Egalement, Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon encadreur Professeur SLIMANI LINDA pour l'encadrement, ses directives et ses disponibilités. Aussi, je les remercie pour ses encouragements, son indulgence, et ses sympathies tout au long des années de travail.

Je voudrais également remercier et exprimer ma gratitude envers : Monsieur GHERBI AHMED, Professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie Monsieur AGGOUNE Lakhdar, Docteur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, Monsieur DIB DJALEL, Professeur à l'Université Larbi Tebessi – Tébessa et Monsieur LABAR HOCINE, Professeur à l'Université Badji Mokhtar- Annaba, pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance et pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelles perspectives.

Je ne peux oublier de remercier mes amies, mes collègues de département Electrotechnique, enseignants, techniciens, agents administratifs de l'université FERHAT ABBAS -SETIF pour leurs sincères souhaits de succès.

Enfin, demande à Dieu d'avoir pitié de mon professeur et mon modèle TAREK BOUKTIR et que Dieu bénisse celui qui nous a quittés et qu'il lui offre le paradis pour dernière demeure.

Sétif, le 24/02/2022

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE .....	XI
<i>Chapitre 01</i> .....	<i>1</i>
QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE .....	1
1.1. Introduction .....	1
1.2. Qualité d'énergie .....	1
1.3. Différents perturbations liées à la qualité d'énergie.....	3
1.3.1. Harmoniques.....	5
1.3.2. Surtensions .....	8
1.3.3. Creux de tension .....	9
1.3.4. Fluctuation de la tension (Flicker).....	11
1.3.5. Déséquilibre .....	12
1.4. Energies renouvelables dans les réseaux électriques .....	14
1.5. Conclusion .....	17
<i>Chapitre 02</i> .....	<i>19</i>
GENERALITE SUR LES ONDELETTES .....	19
2.1. Introduction .....	19
2.2. Transformée en ondelette .....	19
2.2.1. Transformée par ondelette continue .....	21
2.2.2. Transformée par ondelette discrète (DWT) .....	22
2.2.3. Transformée par ondelette paquette (WTP) .....	23
2.3. Transformée de Fourier .....	24
2.3.1. Transformation de Fourier à fenêtre glissante .....	25
2.4. Différence entre la transformée de Fourier et les ondelettes.....	25
2.4.1. Ondelette de Daubechies.....	29
2.4.2. Ondelettes de Symlets .....	29
2.4.3. Ondelettes de Coiflets.....	29
2.5. Propriétés des familles d'ondelette .....	30
2.6. Application de la transformée en ondelette dans les réseaux électrique .....	30
2.6.1. Qualité de l'énergie électrique .....	31
2.6.2. Protection dans les réseaux électrique .....	33
2.6.3. Prévission de charge .....	34
2.6.4. Mesure .....	35

2.6.5. Décharge partielle .....	36
2.6.6. Régime transitoire .....	38
2.7. Conclusion .....	39

## *Chapitre 03* ..... 40

### COMPORTEMENT DES ONDELETTES AVEC LES PERTURBATIONS ELECTRIQUES ..... 40

3.1. Introduction .....	40
3.2. Choix de l'ondelette mère .....	40
3.3. Energie d'un signal .....	41
3.4. Application des ondelettes sur quelques types de perturbations .....	42
3.4.1. Signal pur (non perturbé).....	42
3.4.2. Surtension .....	43
3.4.3. Creux de tension .....	44
3.4.4. Transitoire.....	44
3.4.5. Harmonique.....	45
3.5. Calcule des énergies.....	46
3.6. Classifications les perturbations électriques par les ondelettes et les machines à vecteurs de support.....	47
3.6.2. La méthode proposé .....	50
3.7. Conclusion .....	65

## *Chapitre 04* ..... 66

### LES ONDELETTES ET LES HARMONIQUES ..... 66

4.1. Introduction .....	66
4.2. Harmoniques .....	66
4.3. Effets des harmoniques dans les réseaux électrique .....	67
4.4. Classification de quelques générateurs des harmoniques.....	68
4.5. Dépollution des Harmoniques .....	71
4.5.1. Solutions traditionnelles .....	71
4.5.2. Solutions modernes.....	71
4.6. Filtrage des harmoniques.....	72
4.7. Résultats de simulation .....	75
4.8. Conclusion .....	80

---

<i>Chapitre 05</i> .....	81
<b>LES ONDELETTES ET LA PRÉVISION DE CHARGE</b> .....	81
5.1. Introduction .....	81
5.2. La prévision de charge .....	82
5.3. Objectifs de la prévision de charge .....	84
5.4. Facteurs influencés sur la prévision de charge .....	86
5.5. Réseau de neurones et la prévision de charge .....	87
5.6. Modèle de neurone.....	89
5.7. Modèle proposé .....	91
5.8. Résultats de simulation .....	92
5.9. Conclusion .....	95
<b>CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES</b> .....	97

## Liste des figures

Figure 1-1 Exemple d'un courant harmonique contenant l'harmonique d'ordre 3.....	5
Figure 1-2 Surtension .....	8
Figure 1-3 Creux de tension (Chute de tension) .....	10
Figure 1-4 Fluctuation de la tension (Flicker).....	12
Figure 1-5 Diagramme vectoriel d'un système triphasé.....	13
Figure 1-6 Déséquilibre.....	13
Figure 1-7 le scénario de la réduction des émissions de CO2 a la présence des energies renouvelables entre 2010-2050 [51] .....	15
Figure 1-8 Production d'énergie solaire, éolienne et autre énergie renouvelable jusqu'a 2050 [54].....	16
Figure 2-1 Exemples d'ondelette Mère $\psi_0$ .....	20
Figure 2-2 Décomposition d'un signale sinusoïdale par l'ondelette db2 au niveau 5. ....	20
Figure 2-3 Décomposition par DWT à 5 niveaux.....	22
Figure 2-4 Bloque diagramme le processus de filtrage par DWT .....	23
Figure 2-5 Bloque diagramme le processus de filtrage et de décomposition par WPT.....	24
Figure 2-6 Le domaine d'analyse Temps-Fréquence,.....	26
Figure 2-7 Comportement de la fonction de mère dans la transformée de Fourier et dans la transformée par Ondelettes.....	27
Figure 2-8 Pourcentage d'utilisation des ondelettes dans les différents domaines des réseaux électriques [68]. ....	30
Figure 2-9 Prévision de charge sans ondelettes (WT) et avec les ondelettes (hybride) [102]. ....	35
Figure 2-10 Le signal original et la détection de la décharge partielle par les ondelettes discrète [111].....	37
Figure 2-11 Le régime transitoire .....	38
Figure 3-1 Décomposition d'un signale pur par l'ondelette db4 au niveau 5.....	43
Figure 3-2 Décomposition d'une perturbation de type surtension par l'ondelette db4 au niveau 5 .....	43
Figure 3-3 Décomposition d'une perturbation de type creux de tension par l'ondelette db4 au niveau 5.....	44
Figure 3-4 Décomposition d'une perturbation de type transitoire par l'ondelette db4 au niveau 5.....	44
Figure 3-5 Décomposition d'une perturbation de type Harmonique par l'ondelette db4 au niveau 6 .....	45
Figure 3-6 Distribution d'énergie distorsionné dans chaque niveau de décomposition .....	46
Figure 3-7 La courbe énergétique d'une famille de perturbations électriques.....	47
Figure 3-8 Machine à vecteurs de support (SVM) .....	48
Figure 3-9 Exemples de discrimination binaire entre deux classes et la frontière de décision est représentée en noir.....	49
Figure 3-10 Organigramme et les étapes de classification par SVM.....	50
Figure 3-11 Réseau IEEE 9 jeux de barres.....	51

---

Figure 3-12	Profil de tension des trois phases dans les jeux de barres.....	55
Figure 3-13	La courbe énergétique de la DWT.....	56
Figure 3-14	Classification par SVM binaire entre deux classes (surtension & surtension + Harmoniques).....	58
Figure 3-15	Arbre binaire d'un problème à cinq classes (k=5).....	60
Figure 3-16	La puissance mécanique de la turbine et la vitesse de la MAS.....	63
Figure 3-17	Profil de fréquence, de courant et de la tension dans le J.B 3.....	63
Figure 4-1	Organigramme de classification.....	68
Figure 4-2	Forme d'onde de quelques générateurs d'harmonique selon la référence [8]......	69
Figure 4-3	Performance du réseau de neurone.....	70
Figure 4-4	Modèle de simulation.....	73
Figure 4-5	Les courants de charge avant filtrage.....	75
Figure 4-6	Les tensions de charge avant filtrage.....	76
Figure 4-7	Le spectre d'harmonique avant filtrage.....	76
Figure 4-8	Filtrage par DFT de la phase A.....	77
Figure 4-9	Filtrage par Ondelette de la phase A.....	77
Figure 4-10	L'analyse spectrale (énergie fréquentielle) de la tension de charge.....	78
Figure 5-1	Les secteurs concernés par la prévision de charge.....	82
Figure 5-2	Les différentes horizon de la prévision de charge [138]......	84
Figure 5-3	: Objectifs de la prévision de charge [139]......	86
Figure 5-4	Le modèle mathématique d'un neurone artificiel.....	89
Figure 5-5	Fonction d'activation : "seuil" (a), "linéaire" (b) et "sigmoïde" (c).....	90
Figure 5-6	Le modèle mathématique d'un neurone artificiel de trois couches.....	90
Figure 5-7	Organigramme pour la prévision de charge par les deux méthodes.....	92
Figure 5-8	La prévision de charge pour une journée (24 heures) par la méthode des ondelettes.....	92
Figure 5-9	La prévision de charge pour une semaine (168 heures) par la méthode des ondelettes.....	93
Figure 5-10	La prévision de charge pour un mois par la méthode des ondelettes.....	93
Figure 5-11	La prévision de charge pour 6 semaines par la méthode des ondelettes.....	94

---

## Liste des tableaux

---

Tableau 1-1 Quelques acteurs qui affectent la qualité de l'énergie [8] .....	4
Tableau 1-2 : Spécifications de quelques générateurs d'harmoniques [8] .....	6
Tableau 1-3 Quelques types de perturbation les plus fréquent dans les réseaux électrique [1] [40] .....	14
Tableau 2-1 Familles d'ondelettes .....	28
Tableau 2-2 Les propriétés principales des ondelettes .....	28
Tableau 2-3 Mesure des harmoniques par trois méthodes différentes [4] .....	36
Tableau 3-1 Résultats d'écoulement de puissance dans les jeux de barres génératrices .....	54
Tableau 3-2 Résultats d'écoulement de puissance dans les jeux de barres de charges .....	54
Tableau 3-3 Pourcentage des échantillons hors Classification par le SVM. ....	57
Tableau 3-4 Le code exhaustif d'un problème à cinq classes ( $k=5$ ) .....	61
Tableau 3-5 Pourcentage des échantillons hors Classification par le ECOC-SVM .....	62
Tableau 3-6 Pourcentage de classification de chaque type de perturbation par ECOC-SVM et d'autres classificateurs .....	62
Tableau 3-7 Précision de classification de la méthode proposée par rapport aux autres méthodes .....	62
Tableau 3-8 Résultats d'écoulement de puissance sans et en la présence l'énergie éolienne .....	64
Tableau 3-9 résultats de classification de perturbations générées par l'éolienne à l'aide de l'ECOC-SVM .....	64
Tableau 4-1 Pourcentage de classification de quelques générateurs d'harmonique .....	70
Tableau 4-2 Les résultats comparatifs du THD après filtrage .....	79
Tableau 4-3 Les résultats comparatifs du THD par diverses ondelettes mères dans différents niveaux .....	79
Tableau 5-1 Evaluation de la méthode basé sur les réseaux de neurone par rapport aux méthodes fondées dans la prévision de charge [146] .....	88
Tableau 5-2 Les valeurs de MAPE et MAE de la prévision par les deux méthodes .....	94
Tableau 5-3 Comparaison les résultats de la prévision de charge de différentes ondelettes mères .....	95

## Listes des Acronymes et Symboles

### Acronymes

<i>THD</i>	<i>Taux de Distorsion Harmonique</i>
<i>WT</i>	<i>La transformée en ondelettes</i>
<i>CWT</i>	<i>La transformée en ondelettes Continue</i>
<i>DWT</i>	<i>La transformée en ondelettes Discrète</i>
<i>MRA</i>	<i>l'analyse Multirésolution</i>
<i>WTP</i>	<i>Transformée par ondelette Paquette</i>
<i>TF</i>	<i>Transformée de Fourier</i>
<i>db</i>	<i>Familles d'ondelette Daubechies</i>
<i>sym</i>	<i>Familles d'ondelette Symlets</i>
<i>DFT</i>	<i>Transformation de Fourier Discrète</i>
<i>mse</i>	<i>Erreur quadratique moyenne</i>
<i>MAPE</i>	<i>Pourcentage d'erreur absolue moyenne</i>
<i>MAE</i>	<i>Erreur absolue moyenne</i>
<i>SVM</i>	<i>Machine à vecteurs de support</i>
<i>EP</i>	<i>Ecoulement de puissance</i>
<i>J.B</i>	<i>Jeu de barre</i>
<i>ECOC</i>	<i>Error-Correcting Output Codes</i>

### Symboles

$E_F$	<i>La valeur efficace de la tension fondamentale</i>
$E_H$	<i>La valeur efficace de la tension de l'ensemble des harmoniques</i>
$E$	<i>La valeur efficace d'une tension distorsionnée.</i>
$\psi_0$	<i>Ondelette mère</i>
$a$	<i>Facteur de dilatation</i>
$b$	<i>Facteur de translation.</i>
$R_d$	<i>Résistance non linéaire</i>
$r$	<i>Résistance linéaire</i>
$Ed_7$	<i>l'énergie d'un signal d'entrée au niveau sept</i>
$sgn$	<i>Fonction signe</i>
$P$	<i>puissance active</i>
$Q$	<i>puissance réactive</i>

# INTRODUCTION GENERALE

---

Le développement des usages de l'électricité dans l'industrie induit des exigences dans la qualité de l'énergie à fournir. Pour cela, la qualité de l'énergie électrique est devenue un élément ou bien un sujet important pour les compagnies d'électricité, le personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de sites tertiaires ou industriels et les constructeurs d'équipements [1]. Elle peut être affectée par certains incidents, soit externes comme la défaillance de la source d'alimentation ou bien inhérents à l'installation. Ces défauts détériorent la qualité d'énergie se manifestent sous forme de différentes perturbations.

Avec l'augmentation rapide des énergies renouvelables, la qualité de l'énergie peut être facilement perturbée par la distorsion de cette source dans les réseaux électrique, ce qui peut entraîner des coûts élevés et créer de nombreux problèmes telle que, les surtensions, déséquilibre, fluctuation de la tension, les harmoniques, les creux de tension... etc [2]. D'autre part, la nature des charges connectées aux réseaux électriques a subi aussi des modifications graduelles, telle que : l'éclairage, moteur traditionnelles, les variateurs, charges électroniques hautement sophistiquées et sensibles. Pour cette raison, la fiabilité et la stabilité d'un réseau dépend une large mesure d'un système de protection fiable et aussi un diagnostic efficace.

Par conséquent, pour améliorer et assurer la qualité de l'énergie électrique, les perturbations doivent être détectées et si possible la détection doit être proche de la source de ces perturbations. Une des solutions les plus efficaces pour éviter ces perturbation est l'utilisation des méthodes robuste et efficace ayant pour but, de détecté et de classifié ces perturbation. Ce qui nous permet d'avoir une stabilité sur les réseaux et une conservation de l'énergie. En ce sens, plusieurs méthodes et techniques étaient développé pour détecter et classifier ces différentes types de perturbation, parmi lesquelles les ondelettes [3].

Avant le XIXe siècle et avant la découverte des ondelettes l'analyse de Fourier était la seule technique permettant la décomposition d'un signal et sa reconstruction sans perte d'information. Mais la nécessité de ces ondelettes poussé le chercheur Alfréd Haar à découvrir la premier ondelette en 1909 et ce qui est maintenant connue par 'Ondelette de Haar' [4]. Les ondelettes ont vu le jour lorsque certains sujets d'étude ont nécessité une analyse qui permet de séparer les informations d'un signal dans des bandes spectrales dans un plan bidimensionnel à la fois fréquentiel et temporel au même temps. À ce jour diverses théories ont été développées sur divers

aspects des ondelettes et elle a été appliquée avec succès dans les domaines du traitement du signal, l'imagerie médicale, des données la compression, la compression d'image, le codage sous-bande, la vision par ordinateur, la synthèse sonore...etc.

Les ondelettes ont d'abord été appliquées dans le système de réseaux électrique en 1994 par Robertson [5] et Ribeiro [6]. Depuis cette année, le nombre de publications dans ce domaine a augmenté. L'analyse par ondelettes peut être utilisée dans l'analyse des réseaux de transport et dans la distribution de l'énergie électrique.

Ces applications comprennent la qualité de l'énergie, la prévision de la puissance demandée, la mesure, la protection et la stabilité.

Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans le domaine de la détection et la classification des perturbations qui affectent la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques. Il a pour objectif d'introduire la technique de transformé d'ondelette dans l'analyse et le traitement des problèmes de la qualité de l'énergie électrique. Elle est basée sur la décomposition d'un signale et connaitre le comportement des différents coefficients et des énergies d'un signale perturbé analysé.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse sont répartis dans la suite de ce mémoire dans les cinq chapitres suivants :

➤ Le premier chapitre peut être considéré comme une introduction à la qualité de l'énergie électrique et les différentes perturbations sur les réseaux électriques, ainsi que les différentes méthodes qui ont été proposés précédemment à travers un état de l'art, afin de résoudre les différents problèmes qui affectent la qualité de l'énergie électrique.

➤ Le deuxième chapitre a été consacré à la présentation des ondelettes et un état de l'art sur des méthodes et des applications qui ont été basées sur les ondelettes dans différents domaines dans les réseaux électriques.

➤ Après une description des différents méthodes basées sur la transformée des ondelettes ou d'autres techniques. Le troisième chapitre est réparti en deux parties :

La première partie concerne l'application de la transformé par ondelette sur quelques perturbations typiques existants dans les réseaux électriques telle que : les chutes de tensions, les surtensions, les régimes transitoires et les harmoniques.

Les méthodes les plus courantes pour la conception d'un classificateur multiclasse consistent à déterminer un ensemble de classificateurs binaires et les combiner. Dans ce deuxième partie la machines à vecteurs de support (support vector machine, SVM) est combiné avec la transformée en ondelette afin de classifié quelques types de perturbations électrique. Cette technique se base essentiellement sur la décomposition d'un signal perturbé à différents niveaux de décomposition et de résolution à l'aide de la transformées en ondelettes discrètes (DWT) a fin d'extraire les différentes informations sur ce signal. Ensuite, cette énergie est utilisée pour entrainer le SVM pour classé ces perturbations.

➤ Dans le quatrième chapitre, la transformé en ondelette est combiné avec les réseaux de neurones, afin de développer une méthode qui consiste à faire une classification sur quelques générateurs d'harmoniques. Une partie dans ce chapitre s'agit d'une comparaison entre la transformée par ondelette et la transformée de Fourier à travers un filtrage des harmoniques.

➤ Par la variation temporelle de la demande d'énergie et l'augmentation des énergies renouvelables, la charge électrique est devenue très variable. Pour cela, le cinquième chapitre a porté sur un algorithme de base sur les ondelettes et les réseaux de neurones. Afin de faire une prévision de charge d'électricité à court terme.

L'application de ces différentes méthodes nécessite le logiciel MATLAB.

Le travail se termine par une conclusion et quelques perspectives relatives à ce travail, suivi de la liste des références bibliographiques et des annexes.

# Chapitre 01

## QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

---

### 1.1. Introduction

Depuis des années, les distributeurs d'énergie électrique s'efforcent à garantir la qualité de l'énergie électrique. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité du service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur.

Avec l'augmentation rapide des énergies renouvelables, cette qualité peut être facilement perturbée par la distorsion de ces sources dans les réseaux électriques et peut être soumise à de multiples perturbations et peuvent endommager les machines et fragiliser toutes les installations électriques, ce qui peut entraîner des coûts élevés. La qualité de l'électricité est devenue un sujet stratégique pour les compagnies d'électricité, les personnels d'exploitation, de maintenance ou de gestion de sites tertiaires ou industriels, et les constructeurs d'équipements.

Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle. Ces dispositifs sensibles, mais qui dégradent également cette qualité. Dans les scénarios actuels et avec le développement rapide des réseaux microgrid, la conversion de l'énergie électrique a lancé un défi pour maintenir la qualité de l'énergie dans une plage satisfaisante. Il peut être influencé par la perturbation de tension, le déséquilibre, la fréquence, la distorsion harmonique totale (THD) et le facteur de puissance selon la nature des charges locales et l'état des ressources énergétiques distribuées (DER) [7].

Dans ce chapitre nous allons exposer des généralités sur la qualité de l'énergie et les différentes perturbations et les phénomènes liées à cette qualité. Et par la suite on va mentionner les différentes méthodologies et les différentes études qui ont été menées sur le domaine de la qualité d'énergie.

### 1.2. Qualité d'énergie

La qualité de l'énergie est l'une des propriétés particulières de l'électricité est que certaines de ses caractéristiques dépendent à la fois du producteur / distributeur d'électricité.

La qualité de l'énergie désigne en pratique la qualité de la fourniture électrique. Celle-ci recouvre de trois facteurs différents [2]:

➤ **La continuité d'alimentation**

Qui recouvre les coupures ou interruptions du réseau. Subies par les utilisateurs. Il existe un certain nombre de critères pour classer ces coupures, et il est notamment fait distinction entre coupures programmées et coupures non programmées, et entre coupures longues (supérieures à 3 minutes) et coupures brèves (entre 1 seconde et 3 minutes). Pour les coupures inférieures à une seconde, bien que les notions de coupure très brève ou de microcoupure soient parfois utilisées, on parle généralement de creux de tension (et cela relève alors plus de la qualité de l'onde de tension que de la continuité d'alimentation).

➤ **La qualité de l'onde de tension**

Recouvre les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Différents termes peuvent être utilisés en fonction des caractéristiques de la perturbation: creux de tension, surtensions impulsionnelles, tensions hautes ou basses, variations de fréquence, papillotement, taux d'harmoniques et les inter-harmoniques, déséquilibre entre phases, etc.

➤ **La qualité de service**

Caractérise la relation entre un utilisateur et son gestionnaire de réseau, ainsi que son fournisseur (délai de remise en service, délai d'intervention d'urgence, délai de raccordement, notification de coupure programmée, tenue des horaires de rendez-vous, etc.).

Pour cela, cette qualité est devenue un sujet important pour les compagnies et les consommateurs d'électricité. Par contre, l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique permet d'optimiser les performances électriques et économiques de ces installations.

On générale, la qualité d'énergie est caractérisée par les paramètres suivants :

- Fréquence de 50Hz ou 60Hz ;
- L'amplitude des trois tensions (système triphasé) ;
- Forme d'onde proche d'une onde sinusoïdale ;

➤ Symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage (système équilibré).

D'une façon générale, quelle que soit la perturbation, les perturbations peuvent être classées de deux façons différentes :

• **Effets instantanés :**

Manœuvres intempestives de contacteurs ou d'organes de protection, mauvais fonctionnement ou arrêt d'une machine. L'impact financier de la perturbation est alors directement chiffrable.

• **Effets différés :**

Pertes énergétiques, vieillissement accéléré du matériel dû aux échauffements et aux efforts électrodynamiques supplémentaires engendrés par les perturbations.

Finalement, une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.

### 1.3. Différents perturbations liées à la qualité d'énergie

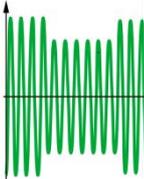
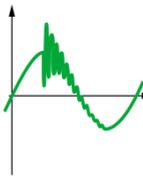
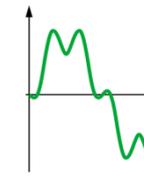
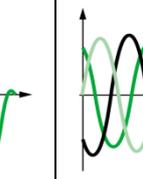
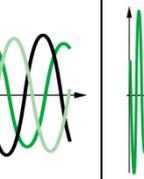
Parmi les facteurs principaux qui occasionnent une dégradation du réseau: les conditions atmosphériques sont les premières causes pour les perturbations qui affectent la qualité d'énergie. Côté usager, deux types d'acteurs agissent et affectent la qualité de l'énergie : le distributeur d'une part, et l'utilisateur d'autre part. On constate le développement des énergies renouvelables et la généralisation des automatismes, onduleur, moteur de puissance, des variateurs de vitesse dans l'industrie, des systèmes informatiques, des éclairages fluo-compact dans le tertiaire et le domestique... etc.

Ces appareils et équipements se retrouvent toujours plus nombreux connectés aux réseaux électrique, ont la particularité d'être à la fois sensibles aux perturbations de la tension et générateurs de perturbations. Parmi les différentes perturbations en constate :

- Creux de tension et coupures (voltage dips and interruptions) ;
- Harmoniques (harmonics), interharmoniques (interharmonics) ;
- Surtensions temporaires (temporary overvoltages) ;
- Surtensions (swell) ;
- Surtensions transitoires (transient overvoltages) ;

- Fluctuations de tension (voltage fluctuations) ;
- Déséquilibres de tension (voltage unbalance) ;
- Variations de la fréquence d'alimentation (power-frequency variations) ;
- Tension continue dans les réseaux alternatifs ;

**Tableau 1-1** Quelques acteurs qui affectent la qualité de l'énergie [8]

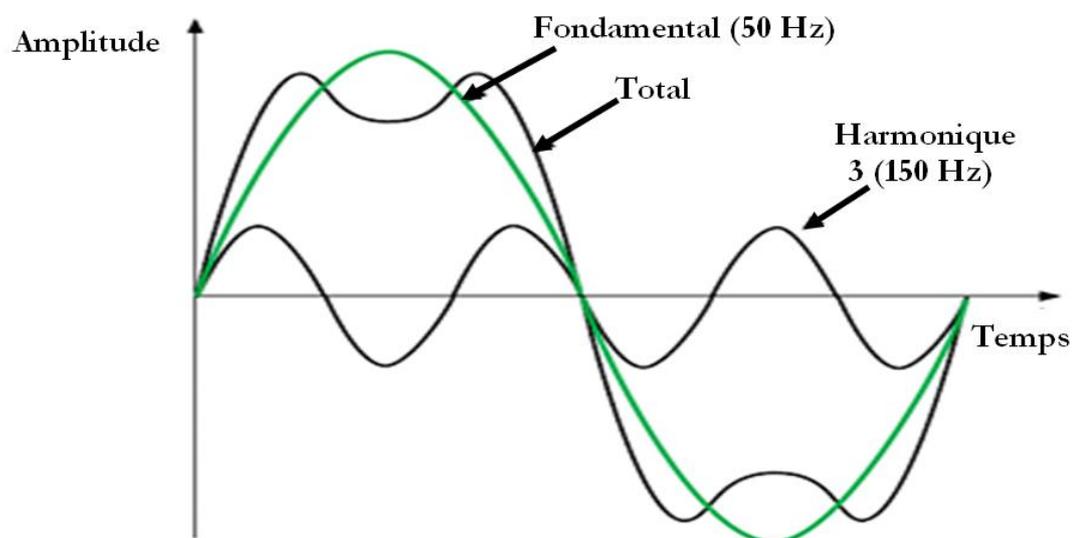
	Type de perturbation	Creux de tension	Surtension	Harmoniques	Déséquilibre	Fluctuation de la tension	
	Forme d'onde						
<b>Réseaux (distributeur)</b>	Défaut d'isolement, rupture du conducteur de neutre						
	Manœuvres et Ferrorésonance						
	Foudre						
<b>Charge (l'utilisateur)</b>	Moteur asynchrone						
	Moteur synchrone						
	Machine à souder						
	Four à arc						
	Convertisseur						
	Charges informatiques						
	Eclairage						
	Onduleur						
Batterie de condensateurs							
			<b>Phénomène occasionnel</b>			<b>Phénomène fréquent</b>	

### 1.3.1. Harmoniques

Les formes d'onde de courant et de tension relevées sur les réseaux électriques de distribution s'éloignent assez souvent de la sinusoïde idéale pure. La déformation de la tension résulte de la circulation sur le réseau de courants non sinusoïdaux. Les éléments du réseau ayant un comportement linéaire, l'effet sur la tension de l'ensemble des courants est la superposition de l'effet qu'aurait chaque courant individuellement.

Les fréquences harmoniques sont des multiples entiers du fondamental de la fréquence d'alimentation (figure 1-1), ces harmoniques proviennent principalement de charges non linéaires est d'absorber un courant qui n'a pas la même forme que la tension d'alimentation. Ces harmoniques se propagent de la charge vers le réseau et ils ont riche en composantes harmoniques qui peuvent engendrent des dégradations de la tension du réseau (chutes de tension) [3].

Les harmoniques généralement varient selon le mode de fonctionnement de l'appareil, l'heure de la journée et la saison (climatisation). La plupart des sources harmoniques génèrent des harmoniques de rangs impairs (tableau 1-2).



**Figure 1-1** Exemple d'un courant harmonique contenant l'harmonique d'ordre 3

Généralement les principales sources d'harmoniques, industrielles ou domestiques :

➤ Les charges industrielles : variateurs de vitesse, redresseurs basé sur l'électronique de puissance, alimentations à découpage, fours à arc, machines à souder, éclairage (lampes à décharge, tubes fluorescents) et des fois les enclenchements de transformateurs de puissance sont aussi générateurs d'harmoniques ;

➤ Les charges domestiques : téléviseurs, fours à micro-ondes, plaques à induction, ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, gradateurs de lumière, équipements électroménagers, lampes fluorescentes ;

Ces sources de pollution sont bien connues, il s'agit d'une dégradation du facteur de puissance et d'une génération de courants alternatifs non sinusoïdaux riches en harmoniques.

Les outils de calcul permettant la détection de la présence des harmoniques sont le calcul du taux de distorsion harmonique THD.

Le calcul du taux de distorsion harmonique THD sert à connaître si le réseau électrique est pollué ou non et s'il y a une présence ou pas d'harmonique. Ainsi, si le THD est égal à zéro, cela indique l'absence d'harmonique.

$$THD = \frac{E_H}{E_F} \quad (1-1)$$

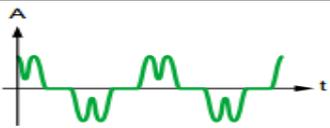
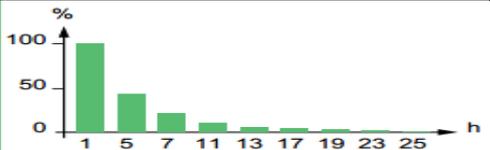
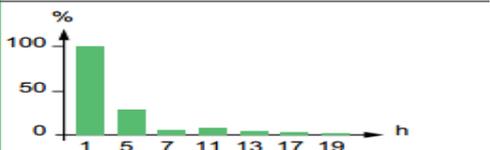
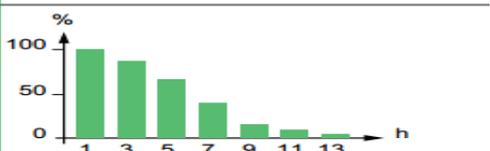
Où :  $E_F$  est la valeur efficace de la tension fondamentale.

$E_H$  est la valeur efficace de la tension de l'ensemble des harmoniques donnée par :

$$E_H = \sqrt{E^2 - E_F^2} \quad (1-2)$$

$E$  : est la valeur efficace d'une tension distorsionnée.

**Tableau 1-2** : Spécifications de quelques générateurs d'harmoniques [8]

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / Chargeur			28 %
Charge informatique			115 %
Eclairage Fluorescent			53 %

Dans la littérature, la majorité des travaux et les études qui ont été réalisé dans ce domaine ont été classés sur trois catégories principales : filtrage, traitement et la classification des harmoniques. [9] et [10] propose une approche, cette approche est basée sur la théorie du filtrage de Kalman afin d'obtenir la meilleure estimation des variations temporelles des composantes fondamentales et des composantes harmoniques.

Une analyse harmonique basée sur la technique des moindres carrés est également présenté par [11], [12]. Les résultats de l'estimation montrent une supériorité aux autres méthodes présentées. L'installation des filtres actifs dans les réseaux électriques sont considérés comme les dispositifs les plus efficaces que les filtres passifs pour réduire les distorsions de tension causées par les harmoniques [13]. De cette façon, plusieurs travaux basés sur les filtres actifs ont été réalisé par [14], [15] et [16] les résultats obtenus par ces travaux ont déjà fourni des contributions positives. Avec le développement rapide et l'utilisation importante des filtres active, le filtre actif parallèle a porté une grande importance dans le demain des harmoniques. Les filtres actifs généralement ont le même design, où la différence réside dans les stratégies de contrôle, la sélection des composants et d'autres considérations économiques et techniques. Une liste de plus de 200 publications de recherche sur le sujet est également annexée et présentée par Singh et les autres dans [17]. Afin de fournir une perspective large aux chercheurs et aux ingénieurs d'application pour le traitement des problèmes liée a la qualité d'énergie. Référence [18] présente une nouvelle conception de commande pour les filtres actifs parallèles pour la compensation des harmoniques dans les réseaux de distribution. La topologie du filtre est basée sur un circuit de contrôle à l'aide d'un réseau de neurone. Les résultats de la simulation montrent que les filtres actifs avec le contrôle d'un réseau de neurone peuvent réduire considérablement la distorsion harmonique du courant de charge et de la tension d'alimentation et peuvent s'adapter aux variations des conditions de fonctionnement du réseau. Une nouvelle méthode de contrôle a été présentée par [19], la méthode et basée sur un contrôle de puissance direct, qui est appliqué pour éliminer les harmoniques dans les courants des lignes afin de compenser la puissance réactive. Concernant les techniques de traitement du signal et des harmoniques: la transformée de Fourier [20], [21], transformée de Stockwell (ST) [21], transformation de Hilbert [22], ...etc.

Au-delà du filtrage et les techniques de traitement des harmoniques, la classification de ces harmoniques est parmi les méthodes efficaces pour contrôler ce type de problème. La classification est une étape nécessaire pour identifier l'origine des distorsions. Un grand nombre d'études existantes dans ce domaine. La structure d'un classificateur est toujours liée avec un ensemble des données des signaux avec les différentes distorsions. Les signaux sont généralement générés à partir d'un modèle mathématique [23]. En ce qui concerne les méthodes de classification, une grande

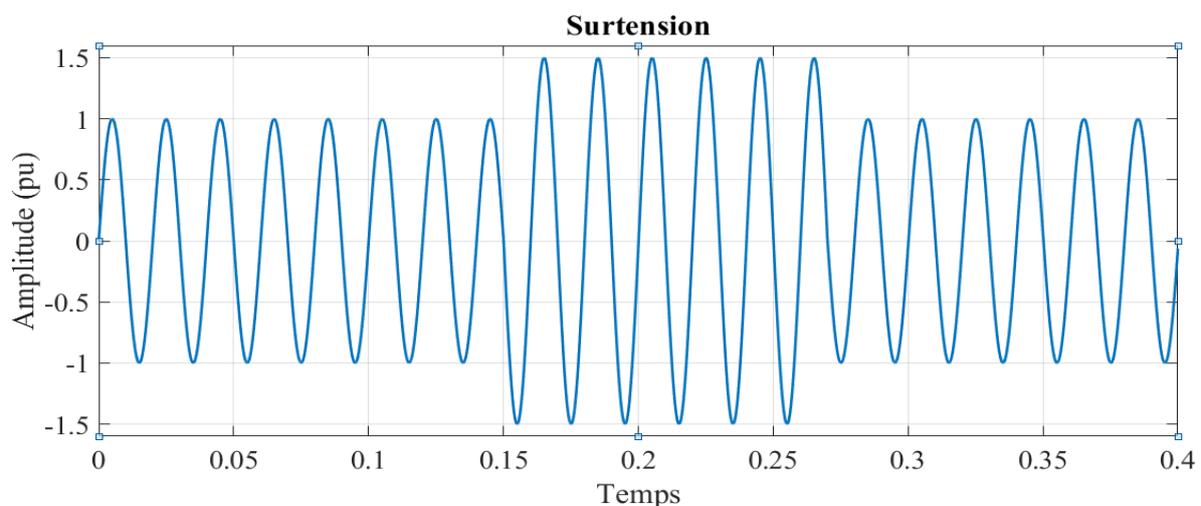
variété de techniques a été précédemment appliqués, et parmi lesquelles : arbres de décision [24], [25], réseaux de neurones [25], [26], machine a vecteur support [27], [26], machine d'apprentissage extrême [29], ...etc. D'autres méthodes sont également présentées dans [29] et [30].

### 1.3.2. Surtensions

La surtension est un phénomène qui se traduit lorsque on applique une tension aux bornes d'un appareil cette tension est supérieure au seuil accepté : c'est une augmentation sur une courte durée du voltage. Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à 1,73 p.u, c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1,5 p.u [1]. Des surtensions peuvent également être provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre), par des déclenchements de charges importantes, par des mauvais fonctionnements de régulateurs de tensions, par Ferro résonance ou par des manœuvres sur le réseau.

Les surtensions sont de trois types :

- Temporaires (à fréquence industrielle) : à la même fréquence que celle du réseau ;
- De manœuvre ;
- Atmosphérique (foudre) ;



**Figure 1-2** Surtension

Les techniques de traitement du signal numérique sont largement les plus utilisées dans le

contexte des réseaux électriques, tel que l'exploitation, la protection, le contrôle et pour l'analyse et la surveillance de la qualité d'énergie [31].

Plusieurs techniques de traitement du signal ont été proposées pour la détection et la segmentation des perturbations de tension. Dans [32], le Filtre de Kalman et un système expert sont utilisés pour segmenter et identifier les différents types de perturbation de tension (induits par défaut, saturation du transformateur, démarrage de moteur à induction). Les principaux inconvénients de cette méthode sont liés soit à l'échec de la détection dans les petits changements de l'amplitude de la tension, soit aux problèmes de résolution temporelle.

Dans la référence [33], les sursensions sont détectées par la valeur RMS. Son principal inconvénient est les mauvais résultats obtenus avec des signaux non stationnaires en raison de la dépendance du RMS à la fois sur la périodicité et la forme d'onde. Un algorithme de détection des sursensions basé sur la transformée en ondelettes, fonctionne même en présence des différentes fluctuations de tension et des harmoniques dans la forme d'onde de la tension, est présenté dans la référence [34]. Les méthodologies basées sur l'intelligence artificielle (par exemple, les réseaux neuronaux et la logique floue) sont des procédures disponibles qui visent à extraire des connaissances de processus complexes [35]. Ces techniques cherchent à combiner l'expérience des opérateurs humains et la capacité d'exécuter en toute sécurité des routines à haute réponse. Ces mécanismes peuvent apporter des améliorations majeures au fonctionnement. Des études ont été réalisées combinant les techniques de l'intelligence artificielle présentées dans [36], [37]. Un algorithme basé sur la transformée en ondelettes et la machine à vecteurs de support est proposé par [38] pour identifier les différentes perturbations sur la tension en particulier les sursensions.

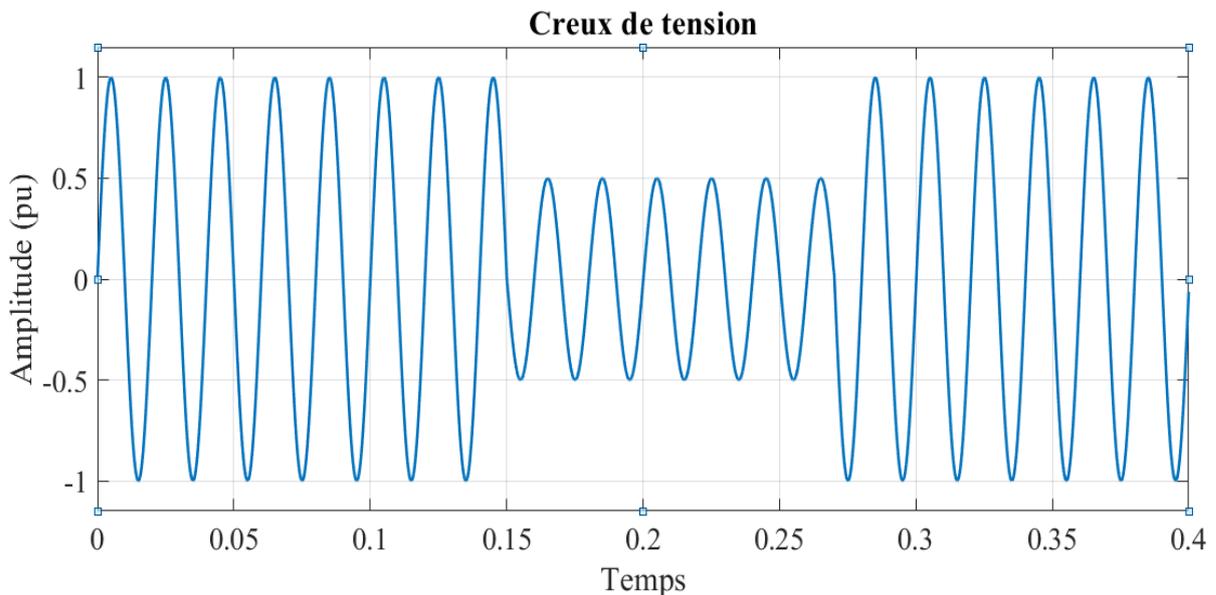
Une nouvelle méthode de détection et de segmentation des sursensions, basées sur l'analyse des composants indépendants (ICA), est présentée par [39]. La méthode peut également être utilisée pour détecter les sursensions même en présence d'autres perturbations de la qualité d'énergie telles que les fluctuations de tension sinusoïdale, les variations de fréquence fondamentale et les harmoniques. Les performances de la méthode proposée ont été évaluées par des signaux simulés et des signaux réels.

D'autres méthodes sont présentées dans [7].

### **1.3.3. Creux de tension**

Un creux de tension (une chute de tension) se caractérise par une baisse ou une chute de l'amplitude de la valeur nominale de la tension 10% à 90% pour une durée de 10ms jusqu'à 1min, dus aux forts appels de courant dus à des défauts du réseau ou des installations des clients. Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les

installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps.



**Figure 1-3** Creux de tension (Chute de tension)

Les court-circuit peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles. Enfin, les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau.

Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes et peuvent provoquer des arrêts du système et des pannes intempestives.

Par exemple, une coupure brève est un cas particulier du creux de tension, sa profondeur est supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée [40].

Enfin, les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les industries.

Plusieurs études ont été menées pour résoudre ce type des problèmes. Les chercheurs dans [41] proposent des techniques générales de prédiction, prévention et de résolution des problèmes associés aux creux de tension. Ces techniques ont été montrées une approche générale pour faire des prédictions sur ce problème en présence des défauts à distance. Les résultats obtenus dans cette étude permettent aux concepteurs de processus critiques de prévoir les pertes de production avant que la conception du processus ne soit terminée. A travers une technique basée sur la prédiction, les résultats qui ont contribué dans la recherche [42] montrent que presque toutes les chutes de tension perturbatrices ont été causées par un courant circulant vers des courts-circuits à l'intérieur

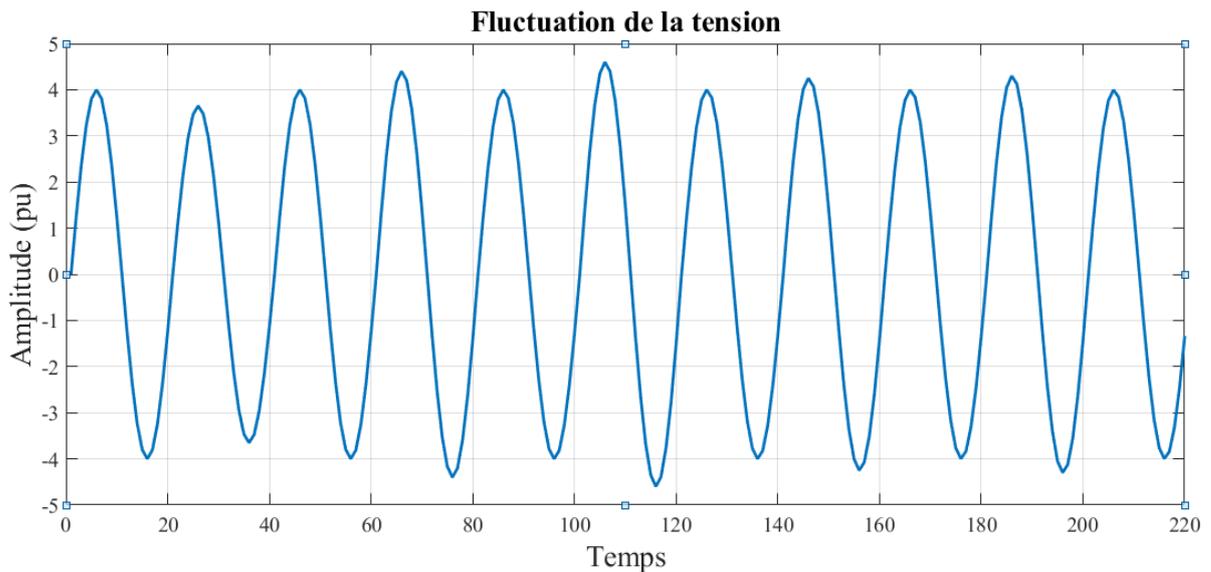
d'une usine ou sur les lignes de services publics dans les chemins électrique. Où ils ont créé plusieurs défauts a des points bien définis pour caractériser les différents caractéristiques de ce type des problèmes afin éviter les interruptions de production. Sur la base d'un modèle de diviseur de tension simple. Du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les industries, les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes. Dans le même contexte, les chercheurs dans les références [43], [44] développés une méthode basée sur un réseau radial, où ils ont divisé ce réseau a des zones de tension et ils ont élevé le niveau de tension dans les zones critiques qui a enregistré une diminution remarquable sur le niveau de tension a des distance bien définis (distances critiques) afin d'éliminer les creux de tension. Les résultats de recherche montrent que le concept de distances critiques fonctionne très bien dans les systèmes et les réseaux radiaux. En présence des défauts équilibrés et déséquilibrés, Chang-Hyun et les autres [45] présentent une méthode basée sur la tension de phase résiduelle afin de déterminer la zone sensible dans un grand réseau maillé (IEEE 30 jeux de barres). La méthode et les résultats obtenus montrent une efficacité remarquable qui permet de détecter et de détecter les zones qui enregistre les creux de tension.

En général et avant l'année 2015 deux techniques sont les plus utilisées pour estimer les creux de tension, la technique des positions des défauts et la technique d'échantillonnage de Monte Carlo. Dans ce sens les chercheurs dans [46], [47] ont réalisé une analyse comparative entre les deux, l'objectif de cette analyse est de déterminer si les méthodologies proposées sont des outils de diagnostic robuste pour évaluer les creux de tension dans les réseaux électriques. Où ils ont découvert à travers les résultats que les deux méthodes sont affectées par les valeurs de l'impédance de défaut, cela signifié que les deux techniques ne sont pas des méthodes efficaces pour une évaluation généralisée pour évaluer ce type de perturbation. Plusieurs études ont été réalisées sur la localisation, la détection et la classification des chutes de tension. L'étude qui a été faite par les scientifiques dans [48], [49] a évalué plus de 30 différentes méthodes pour détecter les sources de ce type de problème. Ils découvrent que la nouvelle méthode basée sur SVM avec RBF avait la plus grande précision de 95%. Par contre les méthodes basées sur les puissances réactives ont donné le bon emplacement de 88% du total des cas simulés.

#### **1.3.4. Fluctuation de la tension (Flicker)**

La mise en service ou hors service des appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable entraînent des variations de tension.

La fluctuation lente de la tension est une variation inférieure à 10 % de la valeur efficace de la tension nominale.



**Figure 1-4** Fluctuation de la tension (Flicker)

Cette fluctuation est due principalement à la variation lente des charges connectées au réseau et des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc, les laminoirs...etc. [8] [40]. La fluctuation de la tension soumette sous deux formes :

- Des variations lentes de tension : se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. Ces variations sont dues principalement au branchement et débranchement des charges et en général ne dépassent pas les %  $\pm 10$  de la tension nominale. Ils ne causent pas de préjudice pour la plupart des équipements électriques.
- Des variations rapides de tension : conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25 Hz. Ces variations sont dues aux charges dont Hz la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à couples pulsatoires ou à démarrages fréquents. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs.

### 1.3.5. Déséquilibre

Le terme déséquilibre sert à caractériser les asymétries d'amplitude et le déphasage des tensions triphasées en régime permanent.

Le déséquilibre d'un système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres (figure 1-5), provoquée par les chutes de tension le long des impédances du réseau dues aux courants inverses par les charges

déséquilibrées, charges monophasées ou biphasées sur les réseaux MT, les défauts monophasés ou biphasés provoquent des déséquilibres jusqu'au fonctionnement des protections

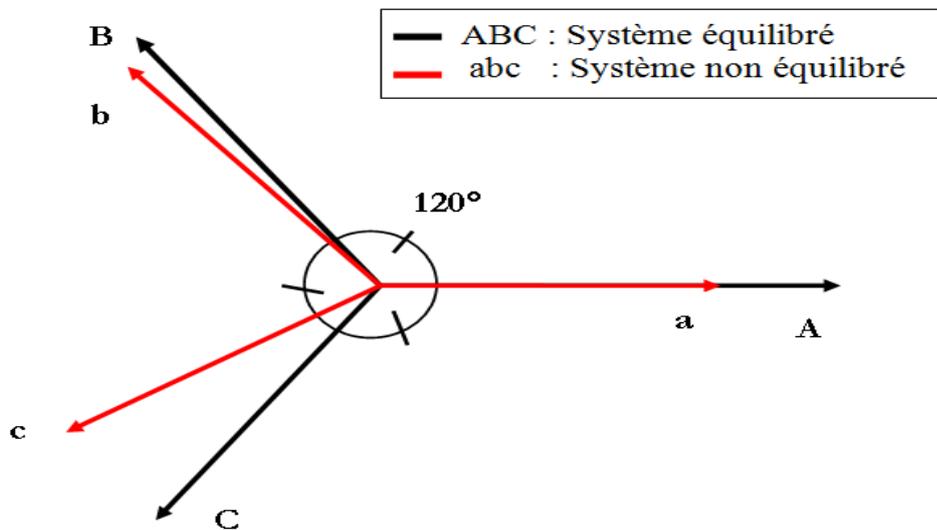


Figure 1-5 Diagramme vectoriel d'un système triphasé

Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre [1].

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase.

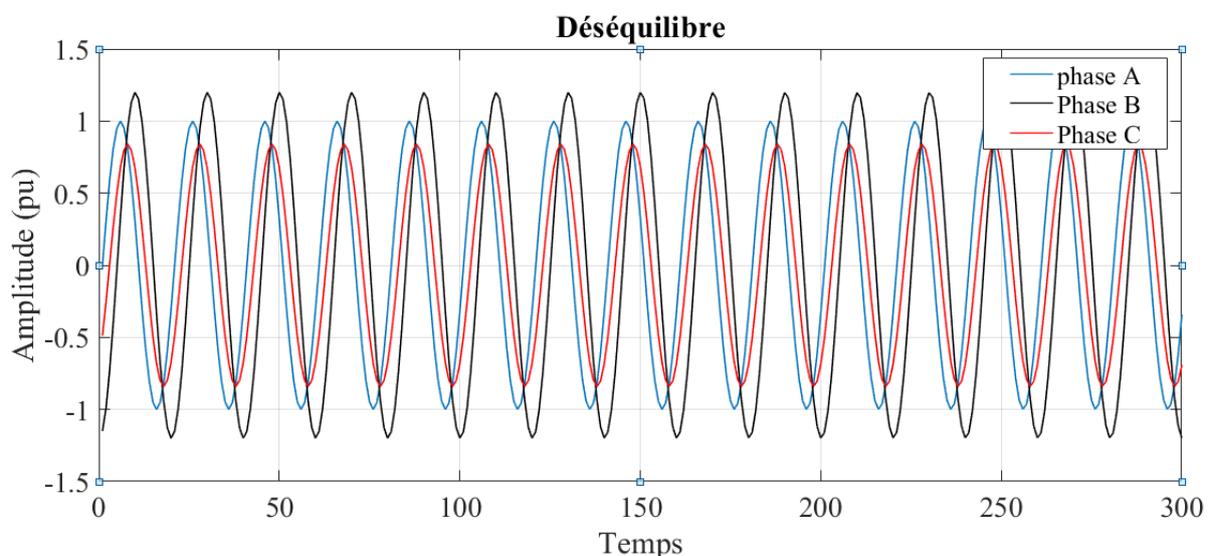


Figure 1-6 Déséquilibre

Le tableau 3 represent quelques types de perturbation les plus fréquent dans les réseaux électrique, leurs origines ainsi que leurs conséquences.

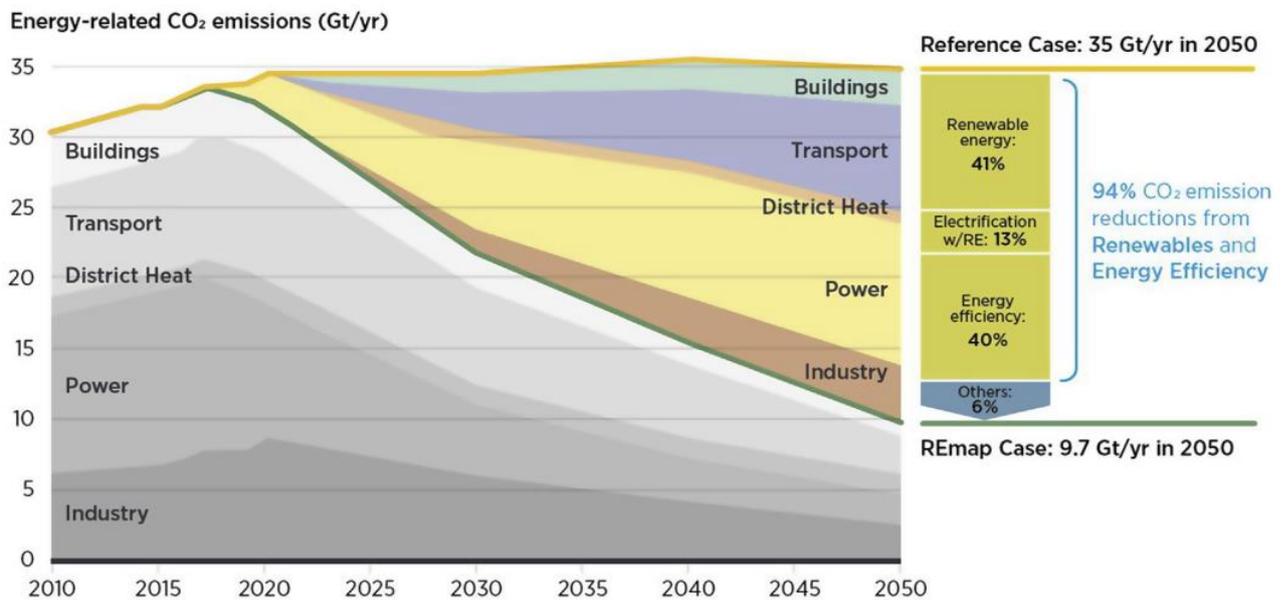
**Tableau 1-3** Quelques types de perturbation les plus fréquent dans les réseaux électrique [1] [40]

Durée	Type de perturbation	Amplitude	Cause	Conséquence
10 ms- 1 min	Creux de tension	1.1-1.9 pu	Courts-circuits, démarrage de gros moteurs, saturation des transformateurs	Arrêts d'équipements, pertes de production
	Coupure brève	< 0.1 pu	Courts-circuits	
	Surtension	1.1-1.8 pu	Courts-circuits, débranchement des charges importantes	Déclenchements, dangers pour les personnes et pour les matériels
Régime établi	Déséquilibre	-	Charges asymétriques ou monophasées	Echauffements des machines tournantes, vibrations
	Variation de tension	0.1-7%	Charges fluctuantes (fours à arc, moteur à démarrage fréquent, soudeuses, éoliennes)	Papillotements de l'éclairage
	Harmoniques	0-20%	Charges non linéaires (structures d'électronique de puissance, arcs électriques, éoliennes)	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels
	Variation de la fréquence	-	Déséquilibre entre la production et la consommation	Dysfonctionnements des équipements électriques

#### 1.4. Energies renouvelables dans les réseaux électriques

Les générateurs d'énergie traditionnelles (non renouvelables) ont toujours existé dans les réseaux mais leur présence n'était pas assez important pour affectent la stabilité et la qualité d'énergie des réseaux électriques. Par conséquent, les gestionnaires des réseaux électriques considèrent ces générateurs comme une charge négative et devaient être déconnectés s'il y a un problème ou bien une perturbation au niveau de réseau (surtension, chute de tension, variation de fréquence, court circuit...etc.) [2]. Au cours des deux dernières décennies, les sources des énergies renouvelables sont apparues comme un complément aux sources d'énergie conventionnelles. Les

ingénieurs dans ce domaine remarquent cette énergie comme une solution efficace pour répondre à la demande de charge soudaine dans les réseaux de distribution [50].

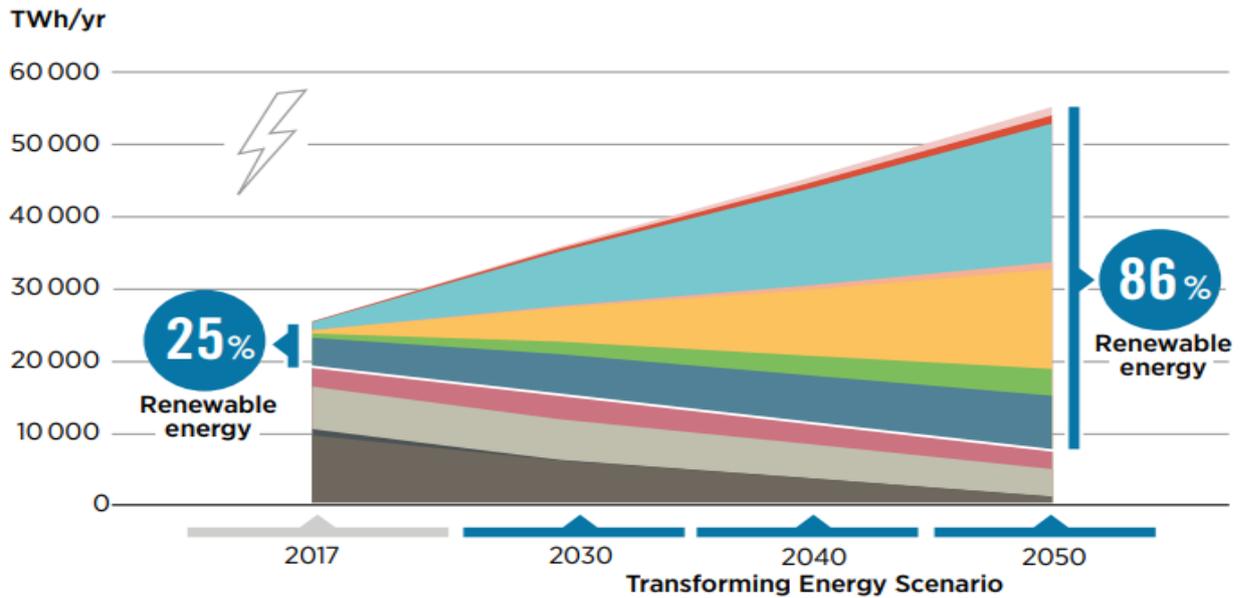


**Figure 1-7** le scénario de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> a la présence des énergies renouvelables entre 2010-2050 [51]

D'autre part et parmi les avantages nécessaires, les énergies renouvelables peuvent fournir les deux tiers de la demande mondiale totale d'énergie et contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 (figure 1-7), afin de limiter l'augmentation moyenne de la température du surface mondiale en dessous de 2° C [51].

Aujourd'hui, on est dans une situation différente par l'augmentation de la consommation d'énergie électrique (augmentation de la puissance demandée), la structure actuelle des réseaux électriques est différent par la présence des générateurs d'énergie renouvelable. Par ailleurs, la production de ce type d'énergie devrait atteindre 25% à 41% de l'énergie totale produite d'ici 2040. Notamment les ressources éoliennes et solaires (photovoltaïques, PV), leur capacité installée pourrait atteindre 7059 GW, soit 49,21% du total de la production en 2040 dans le scénario de développement durable [52].

La découverte de ces énergies renouvelables permettent aux gestionnaire des réseaux de développer les réseaux intelligents (Smart Grid) basé sur la production décentralisée afin d'optimiser et coordonner la production, la distribution et la consommation d'électricité pour avoir une amélioration et une fiabilité énergétique du réseau, au-delà, la production doit s'adapter instantanément à la puissance demandé et le coût de l'énergie électrique pourrait être réduit ainsi que les pertes d'énergie sera contrôlable [53].



**Figure 1-8** Production d'énergie solaire, éolienne et autre énergie renouvelable jusqu'a 2050 [54]

Similaire de leur contribution pour diminuer la pollution de l'environnement, l'intégration de ces générateurs induit des impacts négatifs sur le fonctionnement des réseaux et générera des problèmes sur la qualité d'énergie parmi lesquelles :

- Des effets sur le fonctionnement les équipements de protection dus à propagation de puissance et des courants de court-circuit ;
- Déstabilisation du réseau électrique ;
- Fluctuation de fréquence ;
- Harmoniques ;
- Impact sur le profil de tension (Chute de tension, surtension...etc.) ;

Pour préserver la stabilité des réseaux électrique et une continuité de service, l'étude de ces impacts est nécessaire afin de maintenir la qualité de fourniture de l'énergie électrique. Il est donc importe de rechercher des solutions et des méthodes efficaces permettant de résoudre ce type de problème.

Le réseau de neurone à fonction de base radiale (RBFNN) est mis en œuvre pour une meilleure distribution de puissance dans le réseau microgrid en présence des charges non linéaires et déséquilibrées. La qualité de l'énergie pourrait être améliorée en compensant les harmoniques et le déséquilibre de tension et de fréquence par un modèle RBFNN [55], [56].

La valeur du seuil maximal de la puissance générée par les ressources d'énergie renouvelable est suivie à l'aide d'un réseau neuronal adaptatif (NN). Le NN adaptatif contrôle l'échange d'énergie entre les générateurs de distribution et le réseau électrique public pour satisfaire l'exigence des

charges dans les différentes conditions de fonctionnement [57]. Un filtre de puissance active série est introduit pour compenser les harmoniques de tension et de courant et les interruptions [58]. Un contrôleur à logique floue est utilisé pour améliorer la qualité d'énergie d'un PV à l'aide d'un compensateur synchrone statique (STATCOM) triphasé en maintenant la tension du circuit intermédiaire du convertisseur de source de tension (VSC), est présenté par [59]. En outre, un dispositif de conditionneur de qualité de puissance ANFIS-UPQC est étudié pour améliorer la qualité d'énergie d'un réseau microgrid en tenant compte les différentes perturbations des ressources énergétiques distribuées [60]. L'écoulement de puissances active et réactive, le facteur de puissance, la valeur de THD ainsi que la qualité d'énergie pourraient être contrôlés à l'aide d'un contrôleur d'hystérésis à double bande en présence des énergies renouvelables intégrées au réseau [61].

Une coordination entre le partage de la puissance active et la régulation de tension est contrôlée à l'aide d'un contrôleur statisme dans les réseaux microgride interconnectés AC/DC est présenté dans [62].

Une méthode de filtrage inductivement active, un conditionneur de qualité de puissance unifié (UPQC) alimenté par un photovoltaïque (PV), une compensation de puissance réactive avancée et d'autres méthodes de contrôle avancées sont discutées dans [63] et [64]. Ils ont montré l'importance de la qualité de l'énergie des réseaux électriques afin de satisfaire les fournisseurs et les clients d'électricité. Il existe d'autres outils d'optimisation pour l'amélioration de la qualité de l'énergie, tels que le STATCOM alimenté par un photovoltaïque basé sur l'optimisation JAYA, un modèle de prévision basé sur l'optimisation multi-objectifs, l'optimisation du facteur de puissance à l'aide de données prédictives, etc. [65], [66] et [67].

## 1.5. Conclusion

La qualité d'énergie est devenue un sujet de grand intérêt. Dans ce chapitre on a présenté principaux types de perturbations électriques et leurs caractéristiques qui affectent la qualité d'énergie.

La recherche de la qualité de l'énergie électrique s'inscrit dans le contexte de l'efficacité énergétique. On générale, le domaine de la qualité d'énergie se caractérise par deux grands axes de recherche : les solutions ou des interventions préventive et curatives et des analyses et des mesures de ces perturbations électriques. Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie. Il existe des possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, parmi

eux : conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, Et parmi les solutions aussi est réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou empêcher les perturbations provenant du réseau.

Dans la suite, on va concentrer sur les analyses et sur la classification de différents perturbation les plus gênantes et les plus communément rencontrées, telles que les creux de tension, les surtensions, les variations de tension et les harmoniques. On va toucher aussi les différents techniques et les différents méthodes qui permettent à faire des analyses fortes et efficaces, et parmi ces technique la transformées en ondelettes qui était maintenant une technique récemment dans la qualité d'énergie électrique.

## Chapitre 02

# GENERALITE SUR LES ONDELETTES

---

### 2.1. Introduction

Le développement des ondelettes permis à des nombreux scientifiques à exploiter dans différents domaines parmi eux les réseaux électriques. La transformée en ondelettes a reçu une grande importance au cours des dernières années pour l'analyse de ces réseaux, car l'analyse multi-résolution présente des propriétés bonnes pour l'analyse du signal transitoire.

La première application de la transformée en ondelettes pour l'analyse des signaux non-stationnaires dans les réseaux électrique est depuis 1994 par Ribeiro et Robertson [5], [6].

L'analyse par ondelettes peut être utilisée dans l'analyse des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Les applications d'analyse par ondelettes comprennent la qualité de l'énergie, la prévision de la puissance demandée, la mesure, la protection et la stabilité.

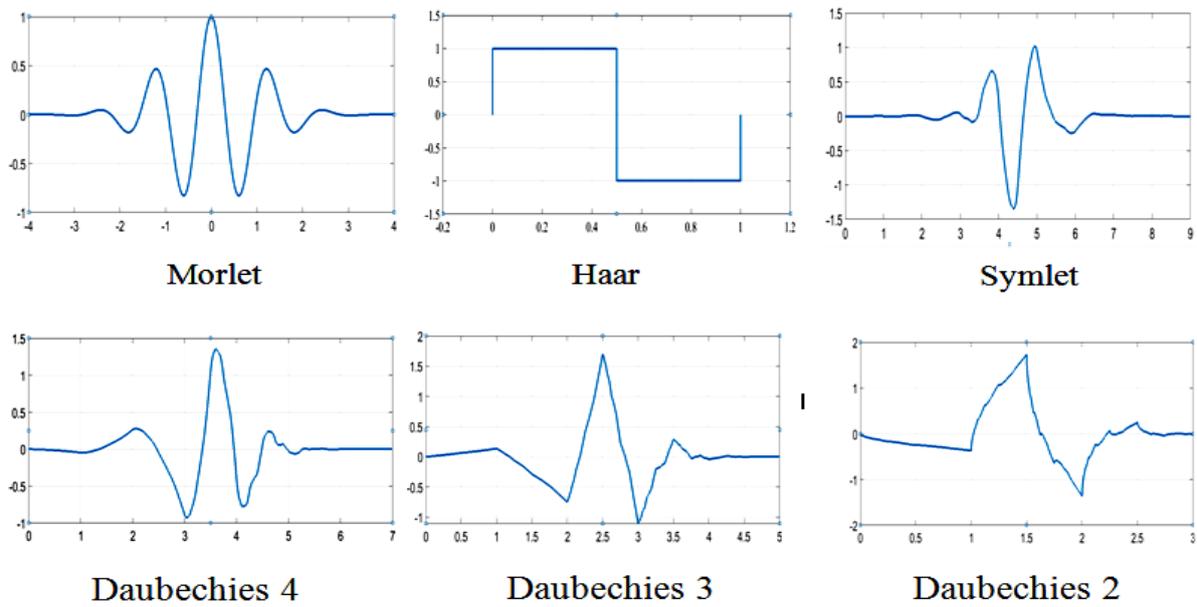
Ce chapitre présente une revue de l'application principale de cette transformée en ondelettes dans les réseaux électriques, on va discuter de plusieurs questions liées aux différentes études et travaux liée à ces ondelettes dans les domaines électriques.

### 2.2. Transformée en ondelette

Le nom ondelette peut être traduit par "petite onde" ce qui implique que l'onde n'est pas infinie mais représente une courte oscillation transitoire d'énergie finie.

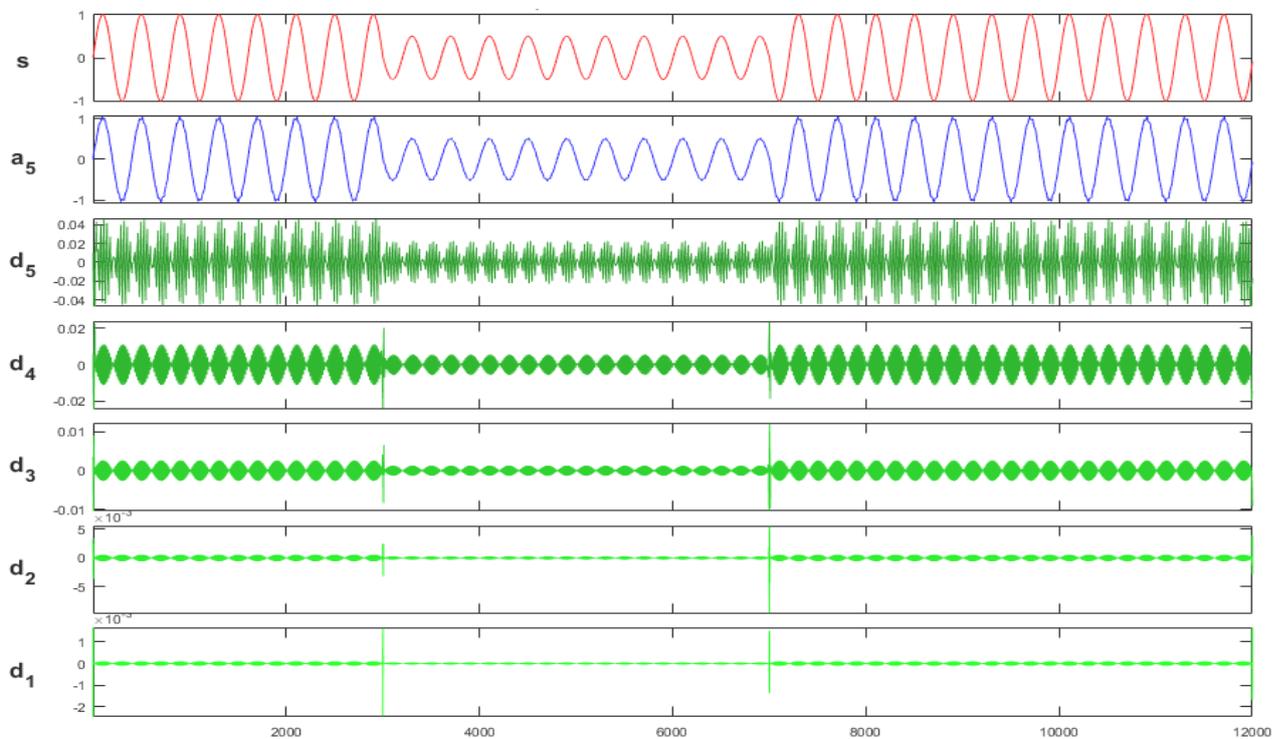
La théorie de la transformée en ondelettes (WT) est l'un des outils d'analyse du signal, basée sur l'analyse du signal en utilisant différentes échelles dans le domaine temporel et la fréquentiel. Le terme ondelettes a été introduit par le géophysicien français Jean Morlet [68]. Cet outil mathématique s'ajoute aux méthodes classiques d'analyse du signal. Les ondelettes fournissent des algorithmes efficaces et rapides pour représenter un signal divisé dans ses bandes de fréquences distinctes à l'aide d'une analyse multi-résolution.

La figure 2-1 montre plusieurs exemples d'ondelette mère. Les ondelettes peuvent être définies comme une classe de fonctions utilisées pour localiser un signal donné dans les domaines temporel et fréquentiel. Cet ensemble d'ondelettes serait construit à partir d'une ondelette mère, qui se dilate ou se translate pour changer la taille de la fenêtre.



**Figure 2-1** Exemples d'ondelette Mère  $\psi_0$

Cela implique qu'une ondelette dilatée donne plus d'informations sur le temps et une version étendue de celle-ci examine les informations de fréquence (figure 2-2). Ainsi, les ondelettes s'adaptent automatiquement aux composants de haute fréquence ou de basse fréquence en utilisant différentes tailles de fenêtre.



**Figure 2-2** Décomposition d'un signal sinusoidal par l'ondelette db2 au niveau 5

Les ondelettes qui sont générées à partir d'une ondelette mère (famille d'ondelettes) en utilisant des dilatations (domaine fréquentiel) et une translation (décalées dans le temps) peuvent être exprimée avec l'équation suivante [4] :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi_0 \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad (2-1)$$

Où  $\psi_0$  est l'ondelette mère qui doit satisfaire  $\int \psi(x) dx = 0$  "a" facteur de dilatation et "b" le facteur de translation.

Dans la figure 2-2, on a appliqué l'ondelette mère db2 a 5 niveaux pour un signal sinusoïdal de fréquence  $f=50$  Hz et qui est représenté par la relation suivant :

$$y = \sin(\omega t) \quad (2-2)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2-3)$$

$$y = (1 - \alpha * ((\text{heaviside}(t-0.15) - \text{heaviside}(t-0.35)))) * \sin(314 * t) \quad (2-4)$$

Où  $t = [0 : 0,0001 : 0,4]$ .

Les ondelettes sont de forme constante mais de taille variable, proportionnelle au paramètre de dilatation « a » (variable d'échelle). La transformation en ondelettes est aussi interprétée comme étant un processus de filtrage du signal analysé par un filtre passe-bande de bande passante variable, c'est le paramètre « a » qui fixe la valeur de cette bande.

### 2.2.1. Transformée par ondelette continue

L'ondelette continue (CWT) est défini pour un signal continu  $x(t)$  qui est multiplié par les conjugués complexes de dilatation et translation de l'ondelette mère.

Le CWT est défini comme suit: est l'ondelette mère décalée par un facteur (b), mis à l'échelle par un facteur (a), les grandes et les basses échelles sont respectivement correspondantes avec les fréquences élevées et les basses les fréquences [68].

$$\text{CWT}(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{a,b}^* dt \quad a > 0 \quad (2-5)$$

Où  $x(t)$  est le signal à analyser:  $\psi_{a,b}$  est l'ondelette mère décalée par un facteur (b), mis à l'échelle par un facteur (a), les grandes échelles et basses sont respectivement correspondantes avec les

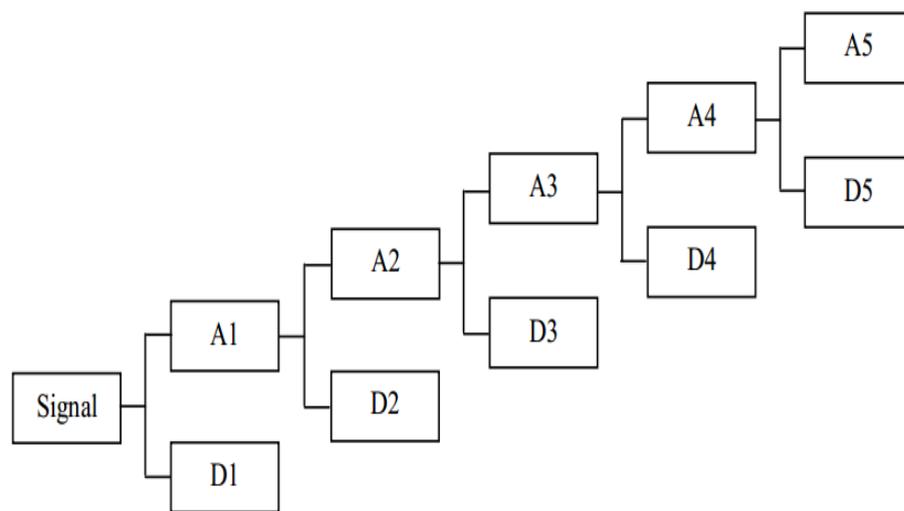
fréquences basses et élevées, et \* désigne une conjugaison complexe.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi \left( \frac{t-b}{a} \right) \quad a > 0 \quad \text{et} \quad -\infty < b < +\infty \quad (2-6)$$

### 2.2.2. Transformée par ondelette discrète (DWT)

L'outil DWT est utilisé pour décomposer un signal discret en différents niveaux de résolution (figure 2-3). Le DWT est un cas spécial de la transformée en ondelette qui fournit un outil de base pour l'extraction de fonctionnalités des signaux discrets et donne une représentation compacte de ce signal en temps et en fréquence [68].

DWT génère une énorme quantité de données sous la forme de coefficients d'ondelettes par rapport au changement d'échelle et de la position. Cela conduit à une grande charge de calcul. Pour surmonter cette limitation, DWT est utilisé, En d'autres termes, dans la pratique, l'application du WT est réalisée dans des ordinateurs numériques en appliquant DWT sur des échantillons discrets.



**Figure 2-3** Décomposition par DWT à 5 niveaux

La DWT utilise une approche significativement différente de la décomposition du signal que le CWT. Le mathématicien Stéphane Mallat a reconnu le caractère passe-bande des ondelettes et l'a combiné avec des techniques courantes de traitement du signal pour éliminer la redondance de la transformée en ondelettes. Son idée était de considérer les ondelettes à l'échelle comme des filtres passe-bande. En redimensionnant les ondelettes de sorte que leur les bandes de fréquences ne se chevauchent que très peu. Il est possible d'extraire toutes les informations requises avec le plus petit effort possible [4].

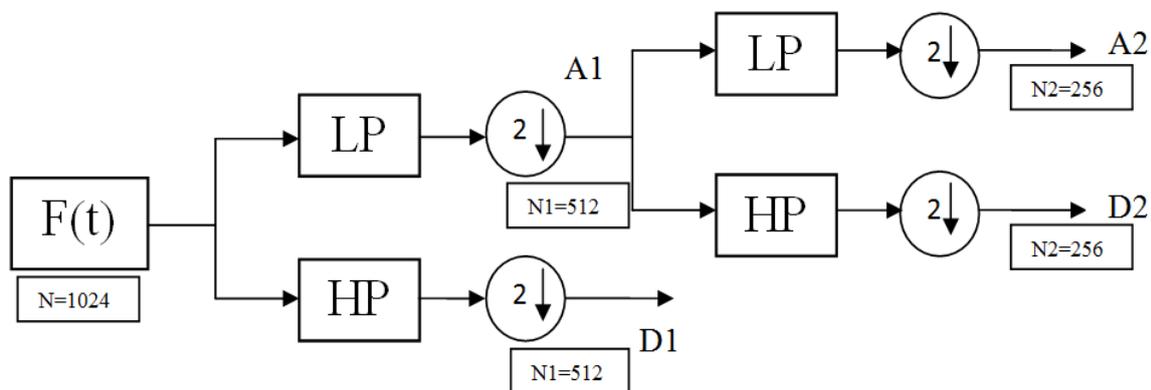
La DWT est défini comme suit:

$$DWT(m, n) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi_{m,n}^* dt \quad (2-7)$$

$$\text{Où } \psi_{m,n}(t) = a_0^{-m/2} \psi((t - a_0^m b_0)/a_0) \quad (2-8)$$

$a = a_0^m$  et  $b = nb_0 a_0^m$ , où  $a_0 > 1$ ,  $b_0 > 0$ , et  $m, n$  sont des nombres entiers.

Dans l'analyse multirésolution MRA, le contenu basse fréquence (sortie du filtre LP) est appelé le coefficient d'approximation (A) et le contenu haute fréquence (sortie du filtre HP) est appelé coefficient de détail (D).



**Figure 2-4** Bloque diagramme le processus de filtrage par DWT

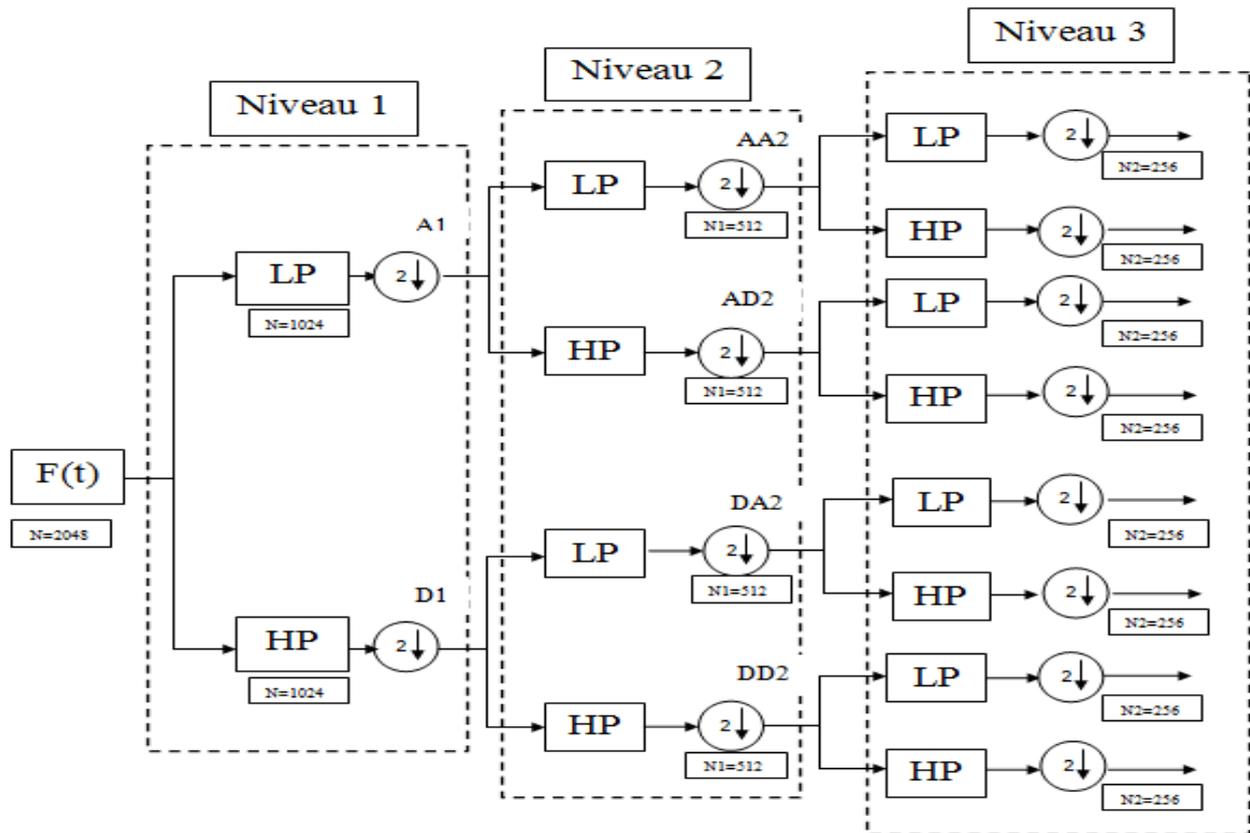
Les coefficients résultants du processus de filtrage passe-bas qui est l'approximation peuvent être traités à nouveau comme données d'entrée pour une banque de filtres subséquente, générant un autre groupe de coefficients d'approximation et de détails. Dans une approche pratique, une DWT dépend du signal d'origine, du filtre passe-bas et du filtre passe-haut utilisés. La mise en œuvre de MRA et DWT peut être illustrée dans la figure 2-4.

### 2.2.3. Transformée par ondelette paquette (WTP)

Dans WPT, les détails ainsi que l'approximation peuvent être divisés comme indiqué sur la figure 2-5. Cela signifie que la WPT est une généralisation de la décomposition en ondelettes discrète ou bien une généralisation de la méthode de la décomposition multi solution [69].

L'avantage de la transformée en ondelette paquette par rapport à la transformée discrète est l'offre d'une gamme d'information plus riche dans l'analyse du signal fuite plus faible. De plus, un

avantage de cette ondelettes par rapport à la transformée standard, ce que la technique des paquets d'ondelettes effectue une partition adaptative dans la bande de fréquence [70].



**Figure 2-5** Bloque diagramme le processus de filtrage et de décomposition par WPT

### 2.3. Transformée de Fourier

L'utilité de la transformée de Fourier est sa capacité à représenter un phénomène temporel dans le domaine fréquentiel. Le signal peut alors être analysé pour son contenu de fréquence. Les coefficients de Fourier de la fonction transformée représentent la contribution des fonctions sinus et cosinus à chaque fréquence ce qui mène à savoir le niveau énergétique de chacune des fréquences élémentaires. L'application primordiale de la transformée de Fourier est donc la mise en évidence des périodicités du signal et le calcul de « l'énergie » contenue dans le signal pour chacune des fréquences. Cependant la transformée de Fourier présente une approche générale du signal  $S(x)$ , les intégrations sont faites de moins l'infini à plus l'infini.

La transformation de Fourier  $TF(f)$  associée à un signal  $s(t)$  s'écrit comme suit :

$$TF(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-2\pi ft} dt \quad (2-9)$$

Où,  $f$  est la fréquence du terme sinusoïdal.

C'est pourquoi la transformée de Fourier ne convient pas aux signaux non stationnaire. Une autre description est donc nécessaire, une transformation qui renseigne sur le contenu fréquentiel tout en gardant la localisation afin d'avoir une représentation temps/fréquence ou espace/échelle du signal.

### 2.3.1. Transformation de Fourier à fenêtre glissante

Pour un signal non périodique, la sommation des sinus et cosinus ne représente pas précisément le signal. La première solution qui vient naturellement à l'esprit est de segmenter le signal en le délimitant à l'aide des fonctions bornées dans le temps (ou dans l'espace) appelée « *fonctions fenêtre* ».

Autrement dit, faire glisser une fenêtre tout au long du signal et calculer à chaque décalage la transformée de Fourier de ce signal tronqué afin d'analyser séparément son contenu de fréquence. On obtient ainsi une transformée de Fourier à fenêtre glissante [71]. L'expression mathématique de cette transformation est :

$$TF(f, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)g(t - a)e^{-2\pi ft} dt \quad (2-10)$$

Cette transformée fait intervenir deux paramètres : la fréquence ( $f$ ) et la position spatiale (ou temporelle) de la fenêtre sur l'axe des abscisses ( $a$ ). Elle nous met en présence d'une résolution espace-fréquence ou temps-fréquence. Elle exprime ce qui se passe pour la fréquence ( $f$ ) autour de la position ( $a$ ). C'est donc une analyse spatiale locale.

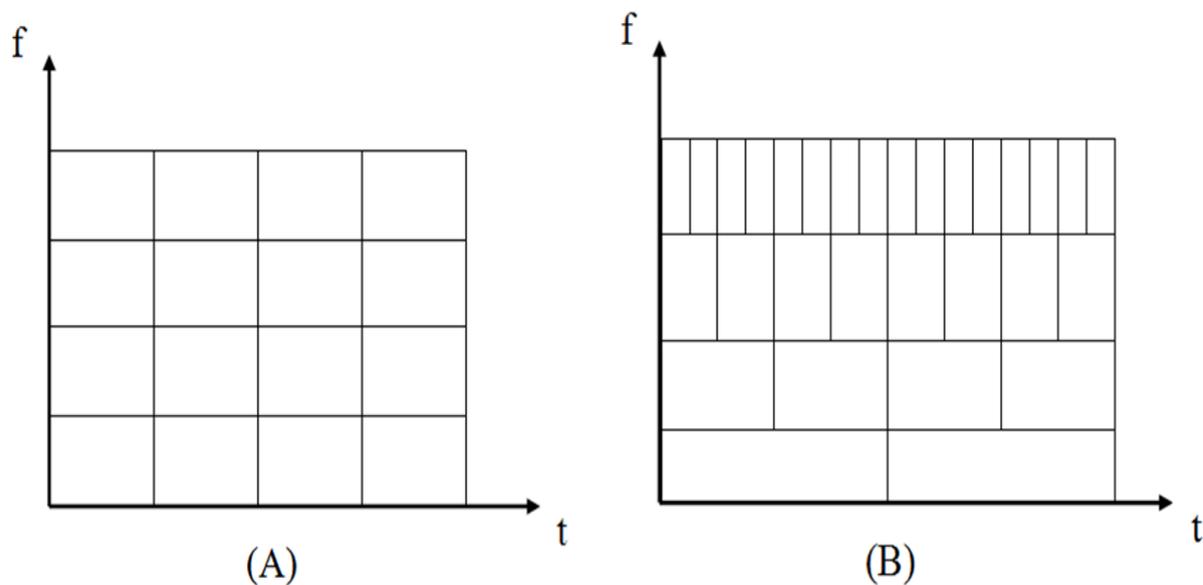
Cependant, l'inconvénient majeur de la méthode de Gabor est que la longueur de la fenêtre est fixée une fois pour toutes, ce qui donne une résolution uniforme en temps-fréquence [72]

### 2.4. Différence entre la transformée de Fourier et les ondelettes

La transformée de Fourier (TF) est bien connue dans le monde scientifique, les mathématiciens, les physiciens ou les ingénieurs l'utilisent en continu dans leurs différents domaines. Au 19<sup>ème</sup> siècle (1822), le mathématicien français J. Fourier, a prouvé que n'importe quelle fonction périodique peut être exprimée comme une somme infinie de fonctions exponentielles complexes périodiques. La transformée de Fourier (TF) permet de mesurer la fréquence et de trouver le

contenu en fréquences d'un signal. Si nous prenons la TF d'un signal du domaine temporel, nous obtenons la représentation « fréquence – amplitude » de ce signal. En effet, une description fréquentielle est souvent plus lisible que la description temporelle et est un complément remarquable à la seule description temporelle.

En effet, la transformée de Fourier est la méthode actuellement utilisée pour convertir les différents mesures dans le domaine fréquentiel. En particulier, cette transformée n'est pas idéale lorsqu'il s'agit un analyse des données non stationnaires qui est constitué un inconvénient majeur [71].



**Figure 2-6** Le domaine d'analyse Temps-Fréquence,  
(A) : transformée de Fourier ; (B) : transformée par ondelettes

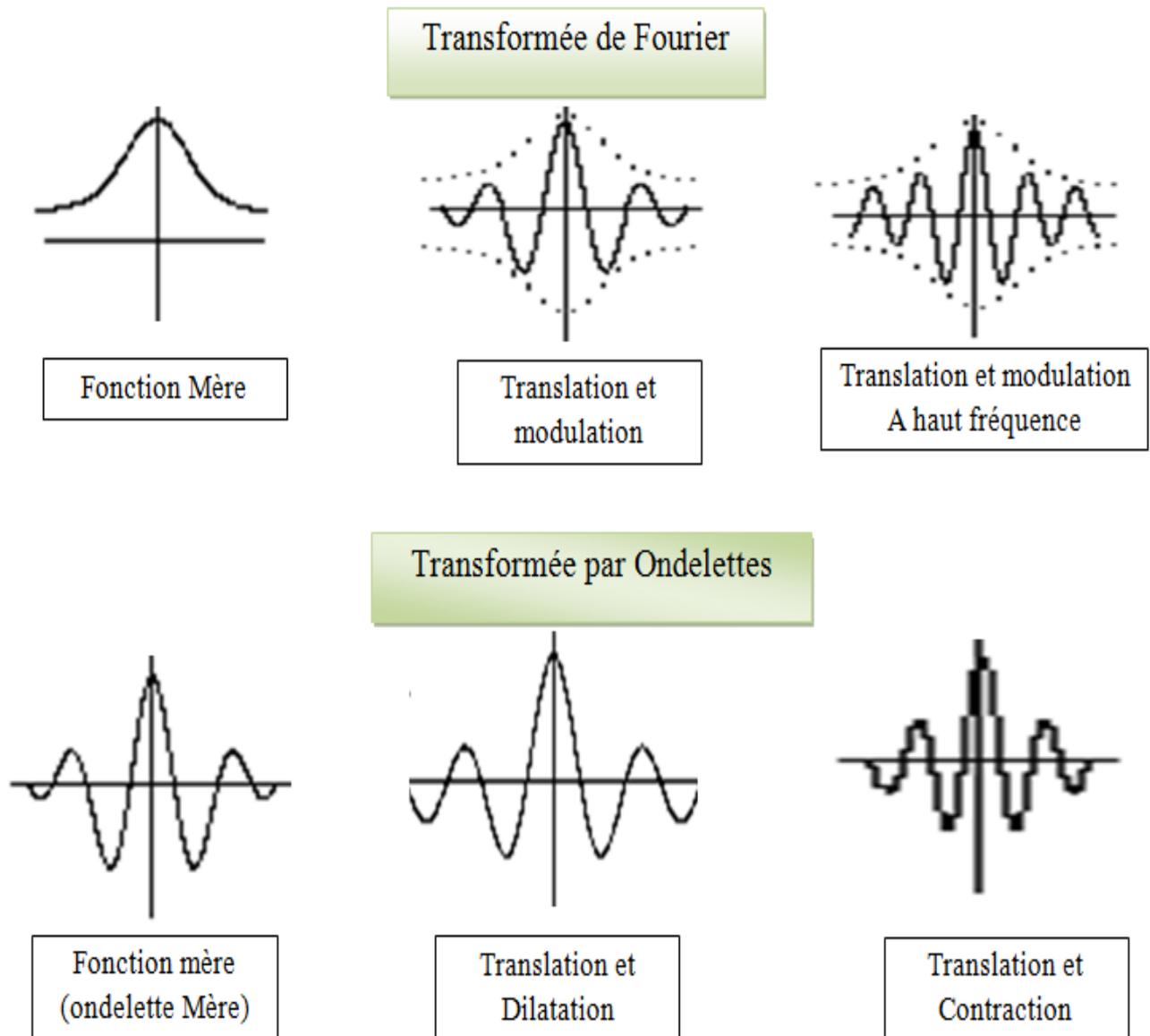
Par contre, la transformée par ondelettes est similaire à la transformée de Fourier avec une fonction complètement différente, où la transformée de Fourier décompose le signal en sinus et en cosinus, c'est-à-dire en fonctions localisées dans l'espace de Fourier, contrairement à la transformée en ondelettes utilise des fonctions localisées à la fois dans l'espace réel et dans l'espace de Fourier.

La question qui se pose : quelle méthode offre la possibilité d'analyser un signal dans le domaine temps-fréquences ?

Dans ce cas, la réponse dépend de l'application et de la nature du signal. C'est-à-dire, l'information temps-fréquence n'est pas nécessaire si la fréquence d'un signal ne change pas dans le temps (cas d'un signal stationnaire), mais elle devient nécessaire quand la fréquence sa change dans le temps

(cas d'un signal non-stationnaire), car la transformée de Fourier indique quelle quantité de chaque fréquence se trouve dans un signal donné mais ne nous indique pas à quel moment dans le temps ces fréquences se passent (figure 2-6).

En conclusion, la série ou bien la transformée de Fourier devient inefficace pour un signal dont le spectre des fréquences varie considérablement dans le temps comme un microscope mathématique [72].



**Figure 2-7** Comportement de la fonction de mère dans la transformée de Fourier et dans la transformée par Ondelettes

La figure 2-7 représente la transformée de Fourier et la transformée en ondelettes, sont deux méthodes de représentation temps-fréquence d'un signal donné qui consistent à le décomposer en somme des fonctions primaires, qui dérivent la translation d'une même fonction "mère» dans les deux cas, par modulation en temps pour la transformée de Fourier, et par contraction et dilatation en temps pour la transformée en ondelettes.

**Tableau 2-1** Familles d'ondelettes

Nom des familles d'ondelettes	Abréviations
Ondelettes de Daubechies	db
Ondelette de Haar	Haar
Ondelettes Symlets	Sym
Ondelettes Coiflets	Coif
Ondelettes biorthogonales	Bior
Ondelette de Meyer	Meyr
Ondelettes gaussiennes	Gaus
Ondelettes gaussiennes complexes	Cgau
Chapeau mexicain	Mexh
Ondelette de Morlet	Morl
Ondelette de Morlet complexe	Cmor
Ondelettes de Shannon complexes	Shan

Les familles d'ondelettes peuvent être caractérisées par quatre propriétés principales : existence de filtres associés, orthogonalité ou bi orthogonalité, support compact ou non, ondelettes réelles ou complexes.

**Tableau 2-2** Les propriétés principales des ondelettes

Ondelettes à filtres		Ondelettes sans filtres	
Orthogonales	Bi orthogonales	Réelles	Complexes
Db, Harr, Sym, Coif	Bior	Gaus, Mexh, Morl	Cgau, Shan, Cmor

Les ondelettes à filtre sont associées à des analyses multi résolution orthogonales ou bi orthogonales (la transformée discrète).

Les ondelettes sans filtre, en revanche, sont utiles pour la transformée en ondelettes continues. En général, les ondelettes à support compact n'ont pas de forme analytique (c'est-à-dire : on sait comment calculer la fonction, mais on ne peut pas l'exprimer avec une formule mathématique).

### 2.4.1. Ondelette de Daubechies

Cette famille d'ondelettes ( $dbN$ ) à un paramètre, due à Daubechies, est la première, permettant de manipuler des ondelettes orthogonales à support compact de régularité arbitraire, on dira que  $N$  est l'ordre de l'ondelette  $dbN$  (ces ondelettes pour les ordres de 2 à 10 ( $db2, db3, \dots, db10$ )).

Cette famille contient l'ondelette de Haar ( $db1$ ), qui est la plus simple et certainement la plus ancienne des ondelettes. Elle est discontinue, ressemble à un échelon.

Cette famille d'ondelettes possède les propriétés suivantes :

- Les ondelettes  $dbN$  sont asymétriques, en particulier pour les faibles valeurs de  $N$ , sauf l'ondelette de Haar ;
- La régularité augmente avec l'ordre ;
- L'analyse est orthogonale ;

### 2.4.2. Ondelettes de Symlets

Les symlets ( $symN$ ) constituent une famille d'ondelettes presque symétrique, proposée par Daubechies en modifiant la construction des  $dbN$ . A part la symétrie, les autres propriétés des deux familles sont similaires. Les symlets d'ordre 2 à 8 ( $sym1$  est simplement l'ondelette de Haar).

### 2.4.3. Ondelettes de Coiflets

Construite par Daubechies sur la demande de R. Coifman les coiflets ( $coifN$ ) constituent une famille d'ondelettes possédant une propriété inhabituelle. Non seulement, comme pour les deux familles précédentes, l'ondelette  $\psi$  associée à  $coifN$  à  $2N$  moments nuls.

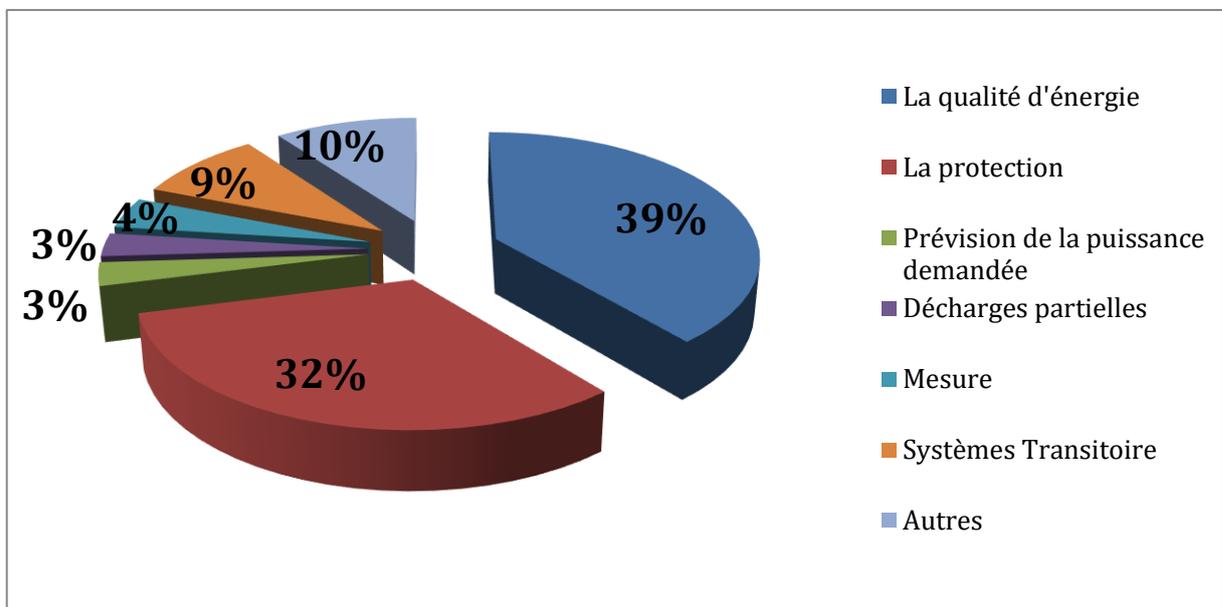
## 2.5. Propriétés des familles d'ondelette

Il existe plusieurs types et familles d'ondelettes dont les propriétés diffèrent selon les principaux critères suivants:

- Le support des fonctions ;
- La symétrie ;
- Le nombre de moments nuls de ;
- La régularité ;
- L'existence de la fonction d'échelle associée à une analyse multirésolution ;
- L'orthogonalité ou la biorthogonalité de l'analyse qui en découle ;

## 2.6. Application de la transformée en ondelette dans les réseaux électrique

Les ondelettes ont d'abord été appliquées dans le système de réseaux électrique en 1994 par Robertson et Ribeiro. Depuis cette année, le nombre de publications dans ce domaine a augmenté.



**Figure 2-8** Pourcentage d'utilisation des ondelettes dans les différents domaines des réseaux électriques [68]

L'analyse par ondelettes peut être utilisée dans l'analyse des réseaux de transport et dans les réseaux de distribution de l'énergie électrique. Ces applications Ils comprennent :

- La qualité d'énergie ;
- Décharges partielles ;
- Systèmes Transitoire dans les réseaux électriques ;
- Protection du système d'alimentation ;
- Prévission de la puissance demandée ;
- Mesure des réseaux électrique ;

La figure 2-8 montre le pourcentage de publications et de l'utilisation des ondelettes dans chaque domaine dans les réseaux électrique.

### 2.6.1. Qualité de l'énergie électrique

Dans littérature, diverses méthodes basées sur la transformée en ondelettes (WT), la logique floue, le réseau neuronal (NN), la machine à vecteur de support (SVM), l'optimisation des essaims de particules (PSO) et l'algorithme génétique (GA) ont été proposées et mises en œuvre pour l'identification et la classification des différents types de perturbations de la qualité de l'énergie. Pour cela, l'examen des coefficients d'approximations et de détails de la décomposition par ondelette à des niveaux très élevés aiderait à déterminer l'apparition des événements de perturbation ainsi que leur temps d'apparition. En comptant sur cela, les techniques DWT, cette technique a été largement utilisée pour analyser les différents types de perturbation dans les réseaux électriques.

[73] Présenter une combinaison de méthode de classificateurs binaires, le classificateur proposé est basé sur la transformée par ondelette et le SVM, cette méthode utilise un SVM multi classe de quatre nœuds, chaque nœud contient un événement (un type de perturbation) est formé et entraîné individuellement, ce qui permet d'être parallèle avec les autres. En général, les résultats affichent de bonnes performances et les différents types de perturbations peuvent être détectés.

[74] propose une nouvelle méthode de classification automatique des perturbations hybrides ou uniques, cet algorithme proposé dépend de la transformation discrète des ondelettes (DWT) et de la sélection optimale des caractéristiques des probabilités de réseau de neurone basée sur la colonie d'abeilles artificielles (PNN-ABC), le DWT à été utilisé pour l'extraction les différents caractéristiques des perturbations et le PNN est appliqué comme classificateur opérationnel et dynamique pour la classification les types de perturbations sur la qualité de l'énergie. D'après les résultats, ils ont constaté que l'algorithme proposé est nettement supérieur pour caractériser et identifier les perturbations hybrides ou uniques. D'autre part, [75] présentent une nouvelle approche consistant d'un filtre de Kalman linéaire et un système de flou-xpert (fuzzy- xpert) pour l'identification et la classification des perturbations qui apparaissent sur la tension et le courant dans

les réseaux électriques. Le filtre linéaire de Kalman avec DWT est utilisé pour extraire les différents paramètres, ces paramètres sont les entrées du système flou-xpert pour identifier la classe de la perturbation. Une nouvelle méthode pour classer et détecter les perturbation électriques basée sur la logique flou (FL) et le réseaux de neurones a la base d'une fonction radiale (RBFNN) est suggérée dans [76], RBFNN utilise les caractéristique extraient par les ondelettes comme entrées pour générer la fonction d'adhésion de la logique floue pour collecter les divers événements en utilisant la détection et la classification de cette logique floue. La comparaison a montré que la précision de classification par la logique floue est améliorée à l'aide de L'optimisation par essais particuliers (PSO), plus de détails dans [77].

D'autres techniques basées sur la logique floue et les ondelettes ont été présentées dans [78] [79]. Swarnabala et les autres dans [80] présentent une autre méthodologie qui utilise une technique de transformée en ondelettes discrètes à chevauchement maximal (maximal overlap discrete wavelet transform MODWT) pour reconnaître et localiser différents perturbation électriques, les coefficients extraits par la MODWT a été utilisé comme entrée pour quelques classificateurs. Les résultats obtenus montrent que l'arbre de décision (Decision Tree DT) fournit une meilleure précision de classification que la machine à vecteur de support (SVM) dans tous les cas avec et sans bruit. Autrement, l'arbre de décision (DT) fonctionne d'une manière satisfaisante avec les signaux synthétisés ou les signaux réels. Le probabiliste de réseau de neurones (PNN) a été utilisé dans [81] comme un outil d'approximation pour la classification les divers événements et l'algorithme génétique (GA) est utilisé pour optimiser les paramètres du PNN. Les résultats démontrent que la méthode est plus précise que les autres méthodes présentées. Une autre méthode a été présentée dans [82], S-transformé à double résolution (S-transform with double-resolution, DRST) combiné avec un graphique acyclique dirigé basé sur des machines à vecteurs de support (DAG-SVMs). Tout d'abord, DRST est utilisé pour une extraction efficace de différentes caractéristiques des signaux électriques. Ensuite, les DAG-SVM classifient et prédisent les divers perturbations. Les résultats obtenus de cette proposition montrent que l'algorithme de classification automatique est puissant avec une capacité de détection forte pour les différentes classes de perturbations de qualité de l'énergie.

Ahila et al. [83] ont montré un schéma d'amélioration des performances pour la machine d'apprentissage extrême (extreme learning machine, ELM) récemment développée pour la classification des perturbations, en utilisant l'optimisation des essaims de particules (PSO). Les résultats ont indiqué que l'algorithme proposé était plus rapide et plus précis pour discriminer ces perturbations, et la précision globale était de 97,6%.

D'autres méthodes basées sur SVM et les ondelettes ont été présentées dans [84], ondelettes et

réseau neurone [74] [70].

En général, chaque recherche a une stratégie différente, ce qui est bon pour fournir des informations et pour prédire les différentes classes de perturbation et chaque méthode a ses avantages et inconvénients.

### 2.6.2. Protection dans les réseaux électrique

Dans la recherche d'un temps d'arrêt plus courts et durée de vie des équipements de protection maximale dans les réseaux énergétique, il est nécessaire de sélectionné des méthodes d'analyse plus efficaces. Sur ce compte, les scientifiques ont choisi les ondelettes comme un outil de base pour la précision de ses analyses en particulier dans les perturbations de courtes durées.

[84] Commencé à analyser les protections des transformateurs de tension (TT) et les transformateurs de courant (TC) a l'aide des ondelettes qui a été déjà fait précédemment par la transformée de Fourier et les différents protections actuelles du courant de défaut interne.

Il existe deux critères principaux pour la sélection de l'ondelette mère dans les systèmes de protection dans les réseaux électriques. En premier, la forme et l'expression mathématique de l'ondelette doivent être définies de telle sorte que l'interprétation physique des coefficients d'ondelettes soit facile. Deuxièmement, l'ondelette choisie doit permettre un calcul rapide des coefficients de la décomposition par l'ondelette [68]. Sur cette base, la procédure de sélection d'une ondelette mère plus appropriée est présentée par [86] pour la localisation du défaut. L'ondelette mère la plus appropriée est celle qui satisfait le maximum d'énergie pour les coefficients de détails dans le niveau 1 de la décomposition à 7 niveaux, en cas d'un défaut. De plus, si cette valeur d'énergie de chaque phase dépasse une valeur de seuil prédéterminée, la perturbation est identifiée comme un défaut dans cette phase.

Les avantages d'application des ondelettes pour améliorer les performances des équipements de protection ont été également introduises par [87]. Les analyses par ondelettes sont utilisées pour le domaine de relais de protection dans les réseaux de distribution, afin d'analyser les signaux transitoires des défauts à la terre dans un réseau résonant mis à la terre de 20 kV généré par EMTP. La transformée par ondelettes est également appliqué a la base d'une technique de longueur minimale de description (MDL) des données, cette technique a été utilisée pour la détection des défauts dans les différents parties d'un réseau électrique.

L'entropie et les critères sont utilisés pour déterminer l'ondelette mère optimale et le nombre optimal de niveaux de décomposition pour avoir une analyse et une détection impeccable de ces défauts. Il s'est appuyé sur cette technique, [88] pour la protection et la détection d'îlotage (une

partie du réseau, électriquement déconnectée du réseau), [89] les défauts dans les jeux de barres, [90] les défauts dans les moteurs, [91] les défauts dans les générateurs et les transformateurs. Les chercheurs dans [92], [93] ont constaté que les tests sur les courants de défaut sur terrain n'est pas suffisants. Cela nécessite des simulations et des méthodes théoriques. Pour le développement de protections différentielles, ils ont utilisé les ondelettes pour le diagnostic des défauts et pour l'identification des régimes transitoires dans les transformateurs. Un algorithme efficace a été obtenu et testée par différents défauts en ligne. Les résultats des simulations donnent des résultats positifs. Plusieurs différents travaux dans ce domaine a été faites par [94], [95] pour évaluer l'efficacité de la protection des transformateurs de puissance.

L'analyse par ondelettes a été aussi utilisé pour la détection de défauts dans les lignes de transmission a la présence des énergies éolienne dans [96], [97], et a la présence des centrales des énergies hybride dans [98].

### 2.6.3. Prévision de charge

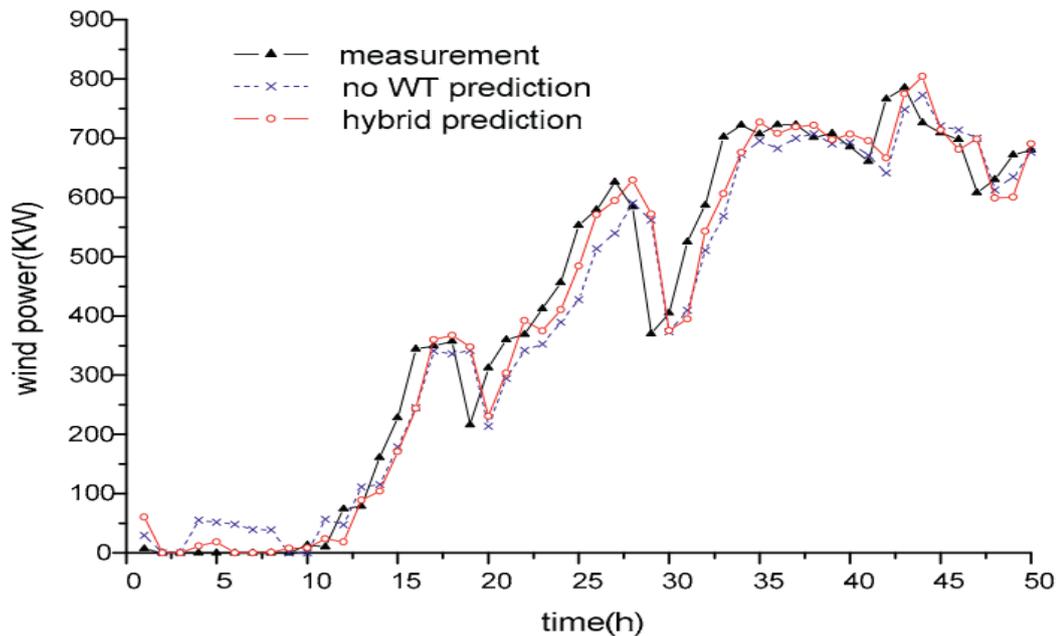
La prévision de charge (la demande d'électricité) est la clé d'une gestion efficace des réseaux électriques. Aujourd'hui l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques, pose de nouveaux défis en raison de son intermittence et de sa variation.

La prévision de la charge à la présence de ces énergies renouvelables joue un rôle important pour traiter ce type des défis. Du point de vue d'analyse du signal, la charge peut également être considérée comme une combinaison linéaire de différentes fréquences. Chaque composante de la charge peut être représentée par une ou plusieurs fréquences. Donc, cette analyse peut être effectuée via les ondelettes et certains compléments pour faire la prédiction.

Au cours de ces dernières années, on parle beaucoup d'apprentissage pour les réseaux de neurones à travers des méthodes et des algorithmes d'apprentissage automatique, par contre [99] [100] ils ont utilisé un apprentissage basé sur les ondelettes pour former le réseau de neurone. Les travaux ont été développés pour la prévision de la charge électrique en combinant les ondelettes et les réseaux de neurones (NN) sont aussi dans [101].

Une méthode de prédiction de l'énergie éolienne à court terme avec un modèle de réseaux de neurones basé sur les ondelettes est présentée par [102] et ils ont introduit les ondelettes dans la série temporelle des énergies éoliennes pour vérifier que les séries de décomposition ont toutes une caractéristique chaotique. Avec une comparaison par autres méthodes (sans ondelettes), ils ont trouvé que les résultats obtenus montrent que la méthode basée sur les ondelettes plus efficaces dans la prévision de charge à court terme a la présence des énergies éoliennes que les autres

modèles, ceci est bien illustré dans la figure 2-9.



**Figure 2-9** Prédiction de charge sans ondelettes (WT) et avec les ondelettes (hybride) [102].

D'autre coté, la prédiction de charge en tenant compte l'un des paramètres essentielle pour la gestion des marchés d'électricité, car les prix d'électricité dans le marché sont de nature très fluctuante.

Dans ce sens les séries de prix ont été complètement décomposée par [103], puis ces séries ont été classées en différents segments pour la prédiction des prix basée sur la transformée en ondelettes.

D'autre méthode basée sur les ondelettes et la logique floue a été présenté dans [104].

Comme résumé on peut dit et observer que l'application des ondelettes est largement étudiée dans la prédiction de charge.

#### 2.6.4. Mesure

En effet, il n'y avait pas beaucoup de travaux sur l'application des ondelettes pour les mesures dans les réseaux électriques.

La plupart des travaux existants dans la bibliographie dans ce domaine été pour la mesure des harmonique à l'aide d'un transformée en ondelettes discrète, tel que [105] [106] qui a proposées la famille de Daubechies et de Vaidyanathan comme des meilleures solutions pour l'analyse et la mesure des harmoniques.

Par contre, l'utilisation de l'ondelette paquette permet de décomposer une forme d'onde d'un réseau électrique a des bandes de fréquences uniformes, avec une sélection adéquate de la fréquence d'échantillonnage et de l'arbre de décomposition en ondelettes, afin d'éviter une fuite spectrale et des fausses mesures [4]. Le tableau suivant montre les résultats obtenus de l'estimation de la distorsion harmonique dans la forme d'onde, par l'utilisation des méthodes proposées et la méthode IEC.

Comme on peut le voir dans le tableau, il y a une différence de mesure dans les différents groupes d'harmoniques, où l'algorithmme avec la fonction d'ondelettes v24 donne une meilleure performance que l'algorithmme de db20 et celle de la méthode IEC.

Dans [107] une application des ondelettes paquette a été développée pour le calcul des indices de qualité d'énergie dans les systèmes triphasés équilibrés et non équilibrés dans des conditions de fonctionnement stationnaires ou non stationnaires. Afin de gérer le cas d'un système triphasé déséquilibré.

**Tableau 2-3** Mesure des harmoniques par trois méthodes différentes [4]

Signal d'entrée		Amplitude (%) Par IEC méthode	Amplitude (%) Par db20	Amplitude (%) Par v24
Ordre d'harmonique	Amplitude (%)			
1	100	100.01	100.01	100.01
3	1	0.98	1.12	1.03
5	2.5	2.53	2.46	2.5
7	1.1	1.08	0.97	1.05
9	0.2	0.19	0.52	0.31
11	0.3	0.3	0.31	0.31
13	0.1	0.12	0.15	0.16
15	0.1	0.24	0.16	0.15

Les chercheurs dans [108] ils ont fait une étude sur les ondelettes mère la plus appropriée avec l'utilisation la DWT pour l'amélioration des systèmes de détection et de mesure des harmoniques à l'aide des signaux de tension et de courant. Aussi [109] propose une méthode de déterminer et de correction les erreurs de mesure basée sur les ondelettes.

### 2.6.5. Décharge partielle

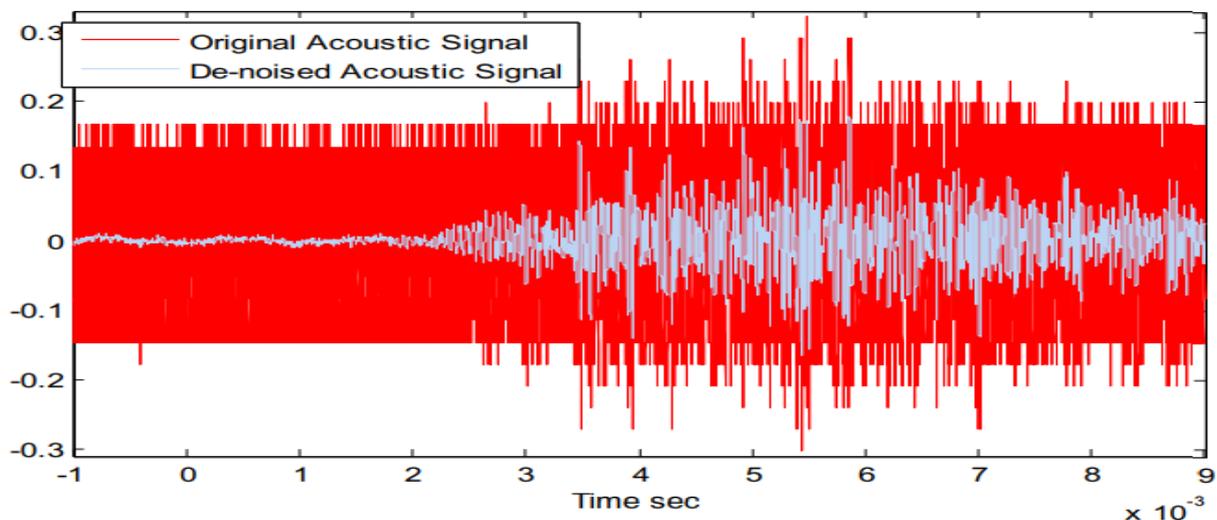
Selon la norme IEC60270, Les décharges partielles sont des décharges diélectriques a courte durée a des fréquences élevées et des faible amplitudes avec une répartition instantanée du champ à

haute tension n'est pas homogène. Pour cette raison, les décharges partielles sont difficiles à détecter, et pour faire des diagnostics sur ce phénomène, généralement les utilisateurs utilisent des appareils de mesure basée sur des méthodes de traitement du signal.

Cependant, les chercheurs dans [68] remarquent que l'utilisation uniquement des ondelettes pour détecter ces décharges est difficile mais on peut les isoler par les bandes de fréquences en effectuant une analyse multirésolution des ondelettes. Dans le même sens, un filtrage adaptatif basé sur la transformée en ondelettes a été fait par [110] pour éliminer le bruit dans les transformateurs.

L'algorithme de filtrage basé sur la théorie des paquets d'ondelettes. Les résultats de simulation montrent que la méthode proposée a un énorme potentiel d'extraction des signaux parasites de la décharge partielle dans les transformateurs. [111] Donne une contribution pour le débruitage (filtrage) des parasites de cette décharge sur les signaux enregistrés dans les transformateurs à l'aide des ondelettes.

La figure 2-10 et les résultats de simulation montrent que la transformée par ondelettes discrète est une méthode efficace et bien connue pour analyser des données de la décharge partielle dans les domaines temporel et fréquentiel.



**Figure 2-10** Le signal original et la détection de la décharge partielle par les ondelettes discrète [111]

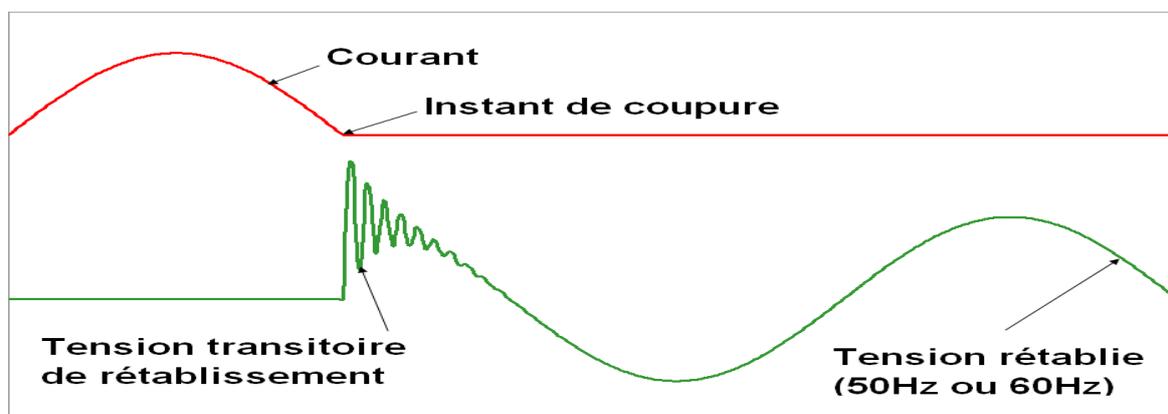
À travers les études précédentes, les décharges ont été détectées et ont été supprimées, mais nous avons aussi besoin de les localiser. La référence [112] propose une méthode basée sur les ondelettes par l'injection des courants parasites dans des nœuds préétablis et mesure le courant dans le neutre et dans la phase, afin d'obtenir un modèle pour localiser ce phénomène. Ils ont conclu que les ondelettes ont une grande capacité pour localiser les décharges partielles.

L'analyse des décharges partielles est maintenant une méthode populaire dans la surveillance des équipements dans les réseaux électrique, et l'analyse par ondelette peut jouer un rôle important dans ce type de phénomène en raison de sa précision dans les domaines temporel et fréquentiel [113]. En général, ce phénomène peut être aussi limité lors de la fabrication des équipements de protection et d'isolation par sa conception et par la qualité des matériaux utilisés.

### 2.6.6. Régime transitoire

Les perturbations de tension plus courtes que les chutes de tension et les surtensions sont classées comme des régimes transitoires, sont causées par les changements soudains dans les réseaux électriques (figure 2-11).

La référence [114] propose une nouvelle approche pour le traitement des signaux transitoires et la classification des défauts lors de démarrage les générateurs de grande capacité par l'utilisation d'un réseau de neurone et les ondelettes. Au moyen d'une transformée par ondelettes, le signal transitoire d'une forme d'onde non stationnaire peut être décomposé en une série temps-fréquence. Les résultats de simulation et les applications montrent que les ondelettes aide les chercheurs pour atteint des résultats efficaces.



**Figure 2-11** Le régime transitoire

D'autre côté, [115] et [116] propose l'utilisation des ondelettes pour différentes applications dans les lignes à haute tension des réseaux électriques.

Les chercheurs dans [117] et [118] propose d'autres méthodes basées sur les ondelettes et la transformée S (est une généralisation de la transformée de Fourier à court terme). Les résultats obtenus à partir de la transformée S sont comparés à ceux obtenus par la transformée en ondelette pour valider l'analyse des perturbations de régime transitoire. D'autres études liées à la transformée

par ondelettes dans les régimes transitoire dans [119] [120].

## **2.7. Conclusion**

La transformée en ondelettes est un outil efficace de traitement du signal qui transforme une forme d'onde dans le domaine temporel dans un domaine temps-fréquence. Ainsi, il est principalement utilisé dans l'analyse des réseaux électrique.

Ce chapitre propose une approche d'application de ces ondelettes dans les réseaux électrique afin de faciliter la recherche d'informations dans ce domaine. Une description sommaire d'application de cet outil dans chaque domaine est présentée avec un objectif principal pour la résolution des problèmes typiques dans les réseaux électriques. Les études et les travaux analysés montrent que la famille d'ondelette Daubechies a été utilisée dans la plupart des applications dans les réseaux électriques, notamment la qualité de l'énergie. Cela signifié que la sélection appropriée de l'ondelette mère joue un rôle important dans la détection, la localisation et l'analyse de différents types d'un signal. Le choix dépend aussi la nature de l'application. Les ondelettes les plus populaires pour la détection des signaux de faible amplitude, de courte durée, de décroissance rapide et oscillants, sont les familles Daubechies et Symlets (db2, db3 et sym2, sym3... etc.). Selon les recherches effectuées, l'utilisation des ondelettes avec les outils d'intelligence artificielle (réseaux de neurones, logique floue, algorithmes génétiques, etc.) a été présentée comme une méthodologie favorable pour diagnostiquer les différentes perturbations dans les réseaux électriques.

## *Chapitre 03*

# COMPORTEMENT DES ONDELETTES AVEC LES PERTURBATIONS ELECTRIQUES

---

### **3.1. Introduction**

Le premier objectif de la thèse a été d'introduire en évidence la transformée par ondelettes, afin de classifié quelques types de perturbation qui affectent la qualité de l'énergie électrique.

Au cours des dernières années, plusieurs études ont été accomplies dans le développement de la théorie des ondelettes, et les gens continuent à trouver de nouveaux domaines d'application. Les ondelettes ont été développées indépendamment dans les domaines de mathématique, la physique, l'imagerie ... etc. Les échanges entre ces champs au cours de ces dernières années ont conduit à des nombreuses nouvelles applications d'ondelettes dans d'autres domaines tels que l'électrotechnique.

En effet, certains chercheurs dans le domaine des ondelettes estiment qu'en utilisant les ondelettes, on adopte un tout nouvel état d'esprit ou perspective dans le traitement des données. L'analyse par ondelettes peut être utilisée dans l'analyse des réseaux électriques.

Ce chapitre est organisé en deux parties. La première partie peut être considérée comme une introduction à l'application des ondelettes sur quelques types de perturbations existants dans les réseaux électriques, afin de vérifier le comportement des ondelettes avec les variations de ces perturbations, et dans la deuxième partie, un modèle de machine à vecteur de support (SVM) été développé, et les résultats ont été comparés puis validés à ceux des techniques présenté précédemment. La méthode proposée donne une précision satisfaisante avec 99,2% par rapport aux méthodes bien connues.

### **3.2. Choix de l'ondelette mère**

Le choix de l'ondelette (type et ordre) adaptée à l'analyse d'un signal n'est pas une chose aisée pour arriver à une optimisation de l'objectif escompté. Dans le souci de répondre au choix délicat du type d'ondelette et de son ordre et afin de mettre plus en relief l'analyse de ces signaux.

La procédure d'analyse des ondelettes consiste à adopter une fonction original ou une fonction

principal d'ondelettes, appelée une ondelette d'analyse ou une ondelette mère. La sélection appropriée de l'ondelette mère joue un rôle important dans la détection, la localisation et l'analyse de différents types de variations de signal, le choix dépend de la nature de l'application [121]. Les ondelettes sont de forme constante mais de taille variable proportionnelle au paramètre de dilatation «  $a$  » ou le variable d'échelle (Equation 2-1). L'intérêt principal lorsqu'on fait un traitement des signaux est de dégager le plus d'informations possible sur la structure temporelle ou sur la structure fréquentielle de ces signaux. Ils convient donc de décomposer le signal sur des fonctions bien localisées à la fois en temps et en fréquence. A partir de ces fonctions bien localisées, appelées ondelettes analysantes, on obtient en considérant leurs dilatations et leurs translations une famille de fonctions "suffisamment riches" pour décomposer un signal sans perdre de l'information.

Pour la détection des signaux de faible amplitude, de courte durée, à décroissance rapide et oscillants, les ondelettes les plus populaires sont les familles Daubechies et Symlets (db2, db3 et sym2, sym3... etc) [68], [86]. Les résultats du test présenté par [95] indiquent que l'ondelette mère Daubechies a montré des performances et une efficacité les plus élevées dans la détection de différentes perturbations simulées. Les ondelettes mères Symlet et Coiflet ont présenté une performance satisfaisante avec une plus grande efficacité que le type Morlet. Par contre, le type ondelettes Haar n'a pas obtenu des bonnes performances pour les cas simulés par rapport aux autres familles. De plus, selon les références [4] et [122], la famille d'ondelettes de Daubechies est très précise pour l'analyse des perturbations liés à la qualité d'énergie parmi toutes les familles d'ondelettes, grâce à sa précision qui pourrait influencer sur la taille de la mémoire et sur la précision de calcul. Dans le même sens, la famille de Daubechies sont proposées comme les meilleures solutions pour l'analyse des harmoniques [123], [105], [106]. Selon les recherches [102], l'ondelette mère Db4 a été utilisée dans la plupart des applications de la prévision de charge dans les réseaux électriques.

### 3.3. Energie d'un signal

Dans la pratique, la plupart des signaux sont des signaux dépendant du temps (du domaine temporel) sous leur format brut. La représentation du signal est une représentation temps - amplitude. Cette représentation n'est pas toujours la meilleure pour la plupart des applications de traitement du signal. Dans beaucoup des cas, l'information la plus pertinente est cachée dans la composante de fréquence du signal. Le spectre de fréquence d'un signal indique quelles sont les fréquences qui existent dans le signal.

L'énergie d'un signal est une caractéristique liée à la quantité de l'information représentée dans

le signal. L'énergie d'un signal,  $x(t)$ , sur l'intervalle  $[t_1, t_2]$ :

$$E(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} S(t)^2 dt \quad (3-1)$$

Ou pour un signal discrète,  $x(n)$  sur l'intervalle  $[N_1, N_2]$  :

$$E(N_1, N_2) = \sum_{n=N_1}^{N_2} x^2(n) \quad (3-2)$$

L'énergie d'un signal perturbé sera divisée en différents niveaux de résolution tout dépend le type de perturbation. Ainsi, la décomposition a différents niveaux de résolution d'un signal à l'aide des équations (2-7 et 2-8). L'énergie utilisée dans notre étude donné par :

$$Ed(K) = \frac{\sum (cdk)^2}{\sum C^2} * 100 \quad (3-3)$$

Où : C est le vecteur contient la décomposition en ondelettes.

Cd est le vecteur contient les coefficients de détail au niveau k, en utilisant le DWT.

### 3.4. Application des ondelettes sur quelques types de perturbations

La transformée en ondelettes spécifiquement conçue pour l'analyse de Fourier à plusieurs échelles, est décrite et montre qu'elle est capable de fournir une représentation locale adaptée aux problèmes de segmentation [121]. Les ondelettes montrant sa capacité à traiter les événements de signal qui sont localisés dans le temps ou dans la fréquence. Afin d'analyser un signal non stationnaire, nous devons déterminer son comportement à tout événement individuel. L'analyse multirésolution fournit un moyen de le faire. Cette analyse multirésolution décompose un signal en une version lissée d'un signal origine et un ensemble d'informations détaillées à différentes échelles.

Les figures 3-1, 3-2, 3-3, 3-4 et 3-5 représentent la décomposition de différents types de perturbation telle que les surtensions les creux de tension, transitoire et les harmoniques on utilisant la famille de Daubechies. L'ondelette «db4» est utilisé pour exécuter le DWT avec 5 niveaux de décomposition.

#### 3.4.1. Signal pur (non perturbé)

Le signal pur est donné par la formule suivante:

$$Y = \sin(314 * t) \quad (3-4)$$

Où  $t = [0 : 0.0001 : 0.4]$ .

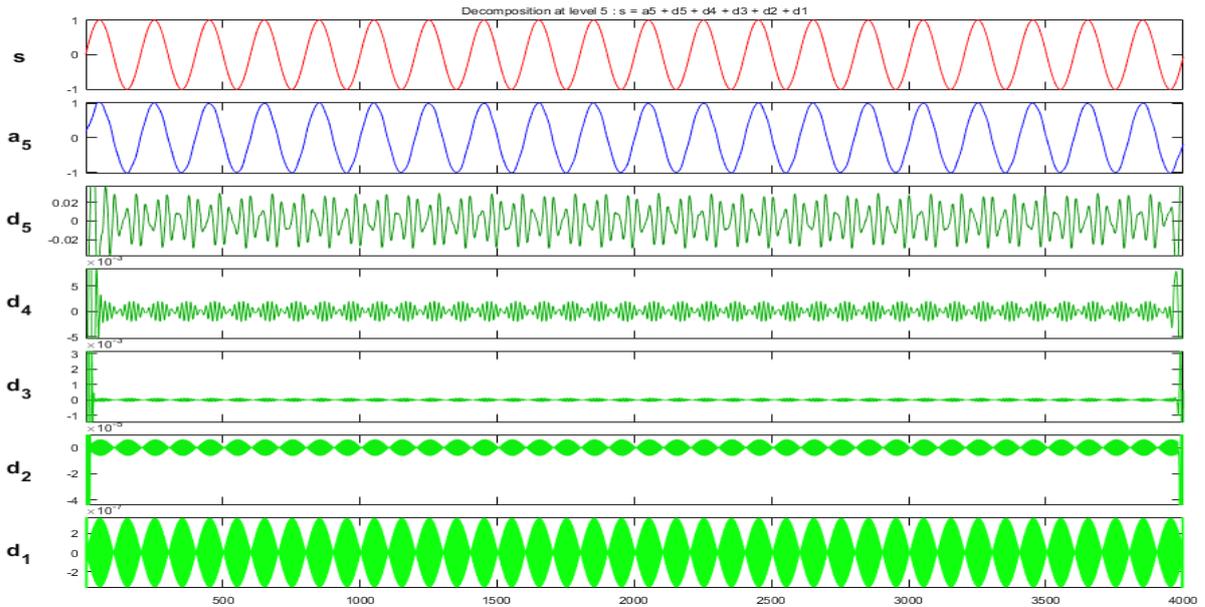


Figure 3-1 Décomposition d'un signal pur par l'ondelette db4 au niveau 5

### 3.4.2. Surtension

La perturbation de type surtension est donné par la formule :

$$Y = \left(1 + \alpha * (\text{heaviside}(t - 0.15) - \text{heaviside}(t - 0.27))\right) * \sin(314 * t) \quad (3-5)$$

Où :  $\alpha = 0.5$ .

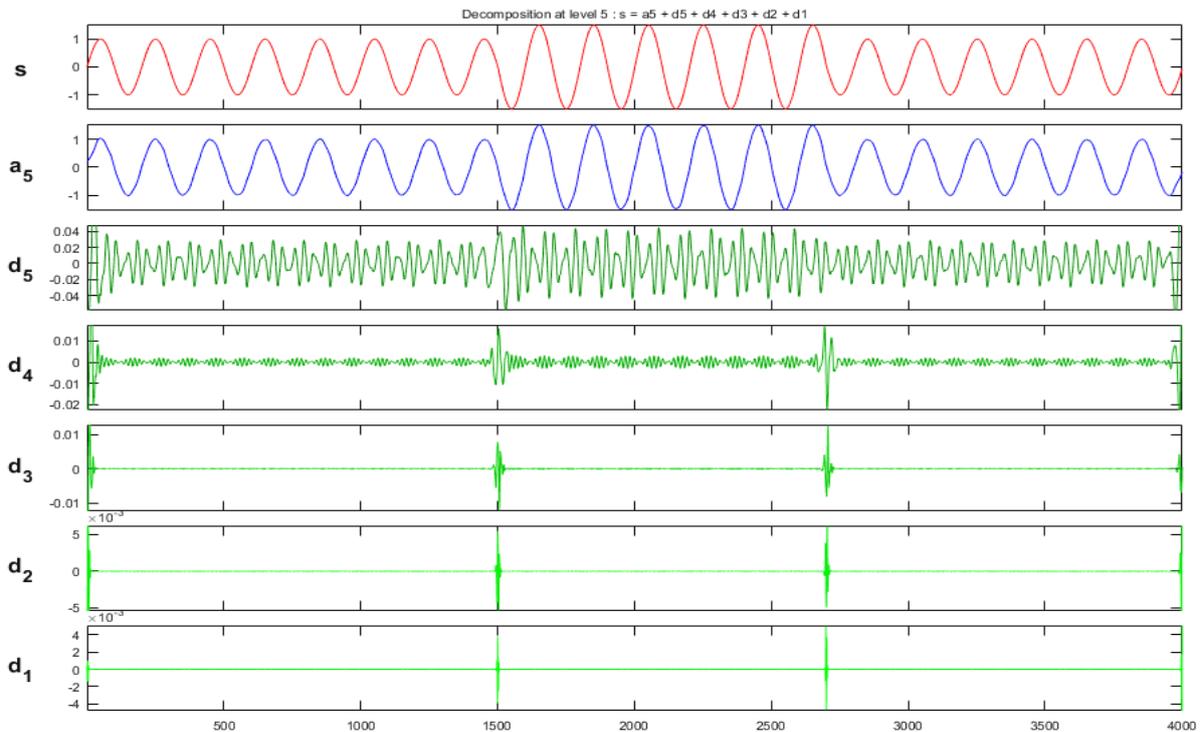


Figure 3-2 Décomposition d'une perturbation de type surtension par l'ondelette db4 au niveau 5

### 3.4.3. Creux de tension

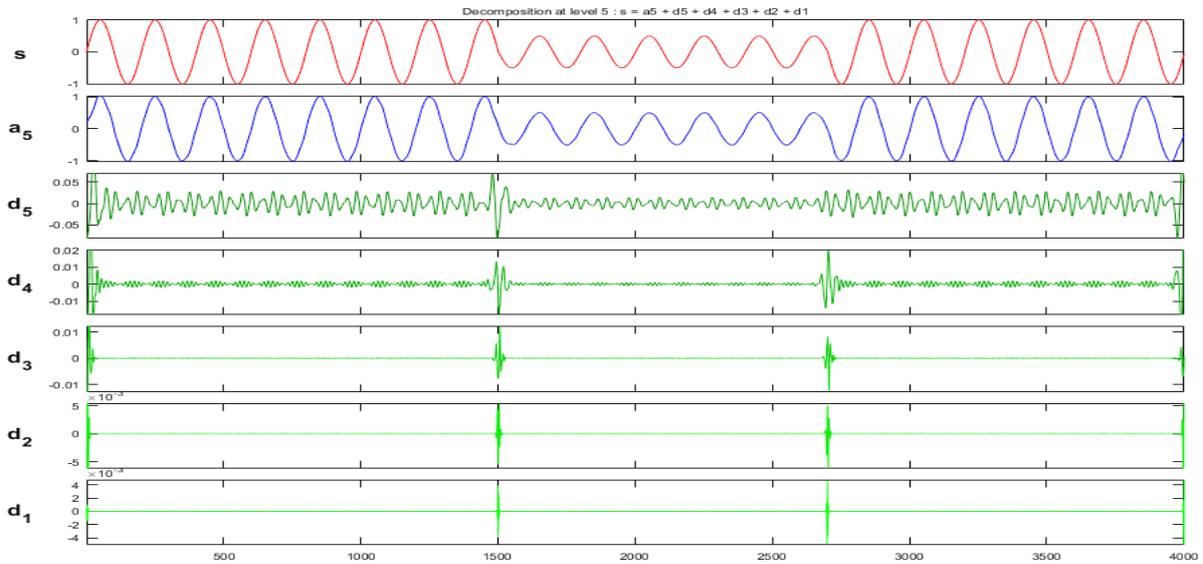


Figure 3-3 Décomposition d’une perturbation de type creux de tension par l’ondelette db4 au niveau 5

La perturbation de type creux de tension est donnée par la formule :

$$Y = \left(1 - \alpha * (\text{heaviside}(t - 0.15) - \text{heaviside}(t - 0.27))\right) * \sin(314 * t) \quad (3-6)$$

Où :  $\alpha = 0.5$

### 3.4.4. Transitoire

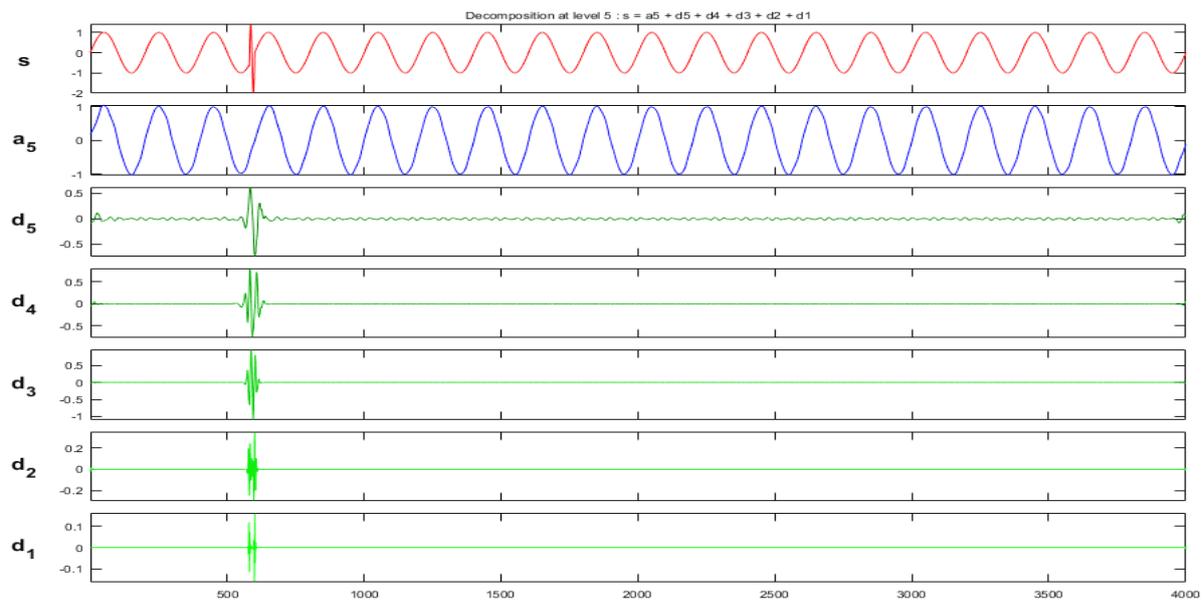


Figure 3-4 Décomposition d’une perturbation de type transitoire par l’ondelette db4 au niveau 5

$$Y = \sin(314 * t) + am * (\text{heaviside}(t - t2) - \text{heaviside}(t - t1)) * \exp\left(\frac{t}{ty}\right) * \sin(2 * 3.14 * fn * t) \quad (3-7)$$

Où :  $fn = 500$  ;  $ap = 1$  ;  $t1 = 0.06$  ;  $t2 = 0.058$  et  $ty = (t1 + t2)/2$ .

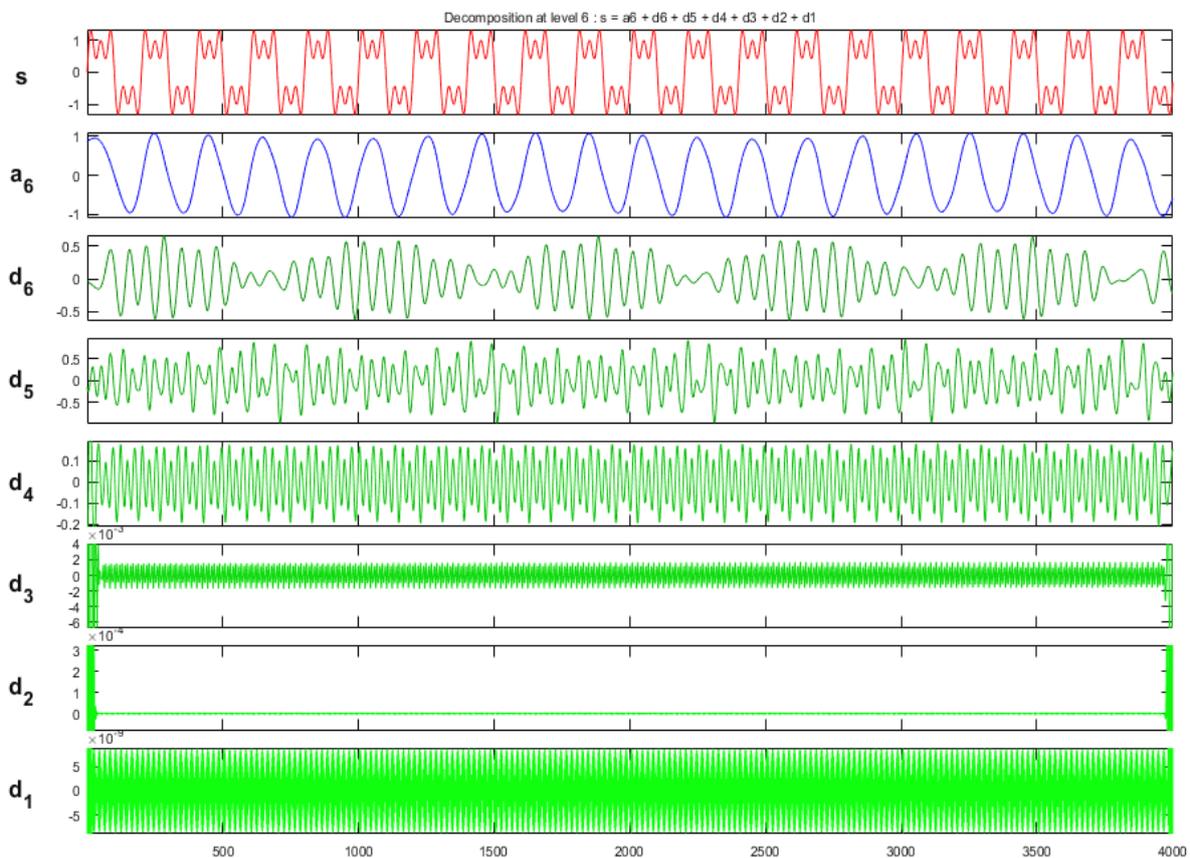
### 3.4.5. Harmonique

La perturbation de type harmonique est donnée par les formules suivantes :

$$a1 = \sqrt{(1 - a3^2 - a5^2 - a7^2)} \quad (3-8)$$

Avec :  $a3 = 0.5$  ;  $a5 = 0.5$  ;  $a7 = 0.15$  ;

$$Y = \sin(314 * t) + a1 * \sin(* 314 * t) + a3 * \sin(3 * 314 * t) + a5 * \sin(5 * 314 * t) + a7 * \sin(7 * 314 * t) \quad (3-9)$$



**Figure 3-5** Décomposition d'une perturbation de type Harmonique par l'ondelette db4 au niveau 6

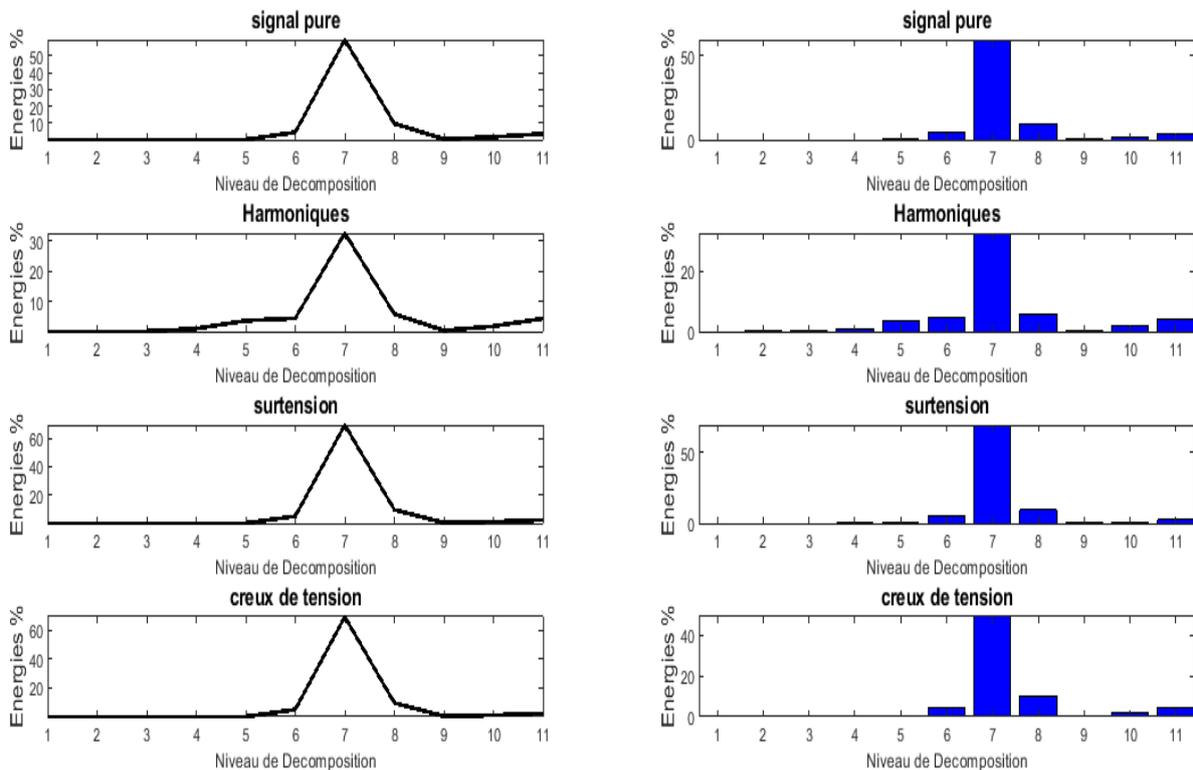
Une fois que nous avons décomposé le signal de cette manière, nous pouvons analyser le comportement des informations détaillées à travers les différentes échelles.

D'autre part, le bruit a un comportement spécifique à travers les échelles comme le montre la figure 3-5, et par conséquent, dans de nombreux cas, nous pouvons séparer le signal et le bruit.

### 3.5. Calcule des énergies

L'ondelette mère Daubechies «db4» est utilisé pour exécuter la transformée en ondelette discrète avec 11 niveaux de décomposition.

La figure 3-6 montre la distribution d'énergie dans les différentes perturbations à chaque niveau de décomposition. Les perturbations à haute et basse fréquence (type harmoniques) se situent au 4ème, 5ème et 8ème niveau. Les résultats montrent que les niveaux de déviation d'énergie dans les creux de tension sont inférieurs par rapport aux niveaux de déviation d'énergie dans le signal pure et les valeurs minimales se concentrent entre le 6ème et le 8ème niveau. Contrairement, la valeur de l'énergie de déviation dans les perturbations de type surtension est supérieure au signal pure, sont également maximale entre le 6ème et le 8ème niveau. Ces chiffres ont été testés et prouvés à plusieurs signaux simulés.



**Figure 3-6** Distribution d'énergie distorsionnée dans chaque niveau de décomposition

Les pourcentages d'énergie dépendent de nombreux facteurs, la valeur de la perturbation, la durée et le nombre des points utilisés. En utilisant les informations extraites par la technique MRA à différents niveaux avec la courbe d'énergies (figure 3-7), ce type de perturbation devient plus facile à détecter et nous pouvons également localiser et classer plusieurs perturbations liées à la qualité d'énergie.

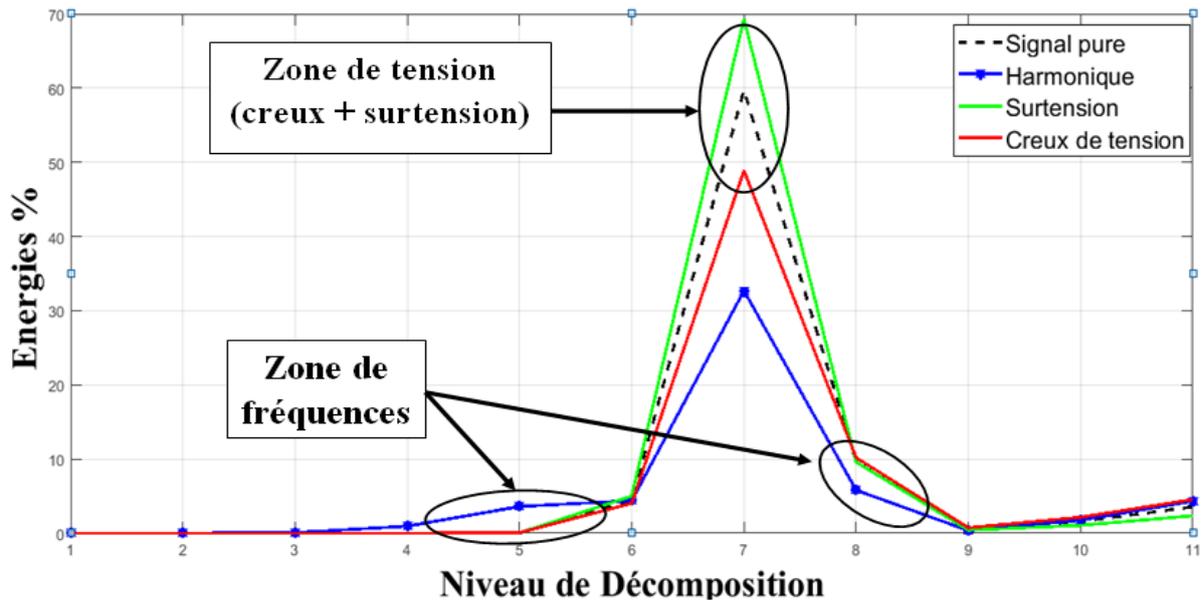


Figure 3-7 La courbe énergétique d'une famille de perturbations électriques

### 3.6. Classifications les perturbations électriques par les ondelettes et les machines à vecteurs de support

#### 3.6.1.1. Machines à vecteurs de support (SVM)

- Une machine à vecteurs de support (SVM) est l'un des révolutions en apprentissage artificiel, souvent traduit par l'appellation de Séparateur à Vaste Marge (SVM), est un classificateur connu par un séparateur hyperplan. En d'autres termes, les SVMs ont des classes d'algorithmes d'apprentissage initialement définis pour résoudre des problèmes de discrimination et de régression, c'est-à-dire la prévision d'une variable qualitative binaire, si bien qu'ils sont considérés aussi efficace que les réseaux de neurones. Ils sont basés sur la recherche de l'hyperplan de marge optimale qui lorsque c'est possible, classe ou sépare correctement les données tout en étant le plus éloigné possible de toutes les observations.

- Le principe est donc de trouver un classificateur, ou une fonction de discrimination, dont la capacité de généralisation (qualité de prévision) est la plus grande possible.

➤ **Hyperplan** : Un hyperplan est un classificateur qui va séparer les données et maximiser la distance entre les classes (figure 3-8).

Recherche d'un hyperplan, dit de marge optimale (vaste), pour la séparation de deux classes dans un espace hibernien défini par un noyau reproduisant associé au produit scalaire de cet espace. Estimation de l'hyperplan dans le cas linéaire et séparable, les contraintes actives du problème

d'optimisation déterminent les vecteurs supports. Extension au cas non séparable par pénalisation.

Extension au cas non linéaire par plongement dans un espace hilbertien à noyau reproduisant.

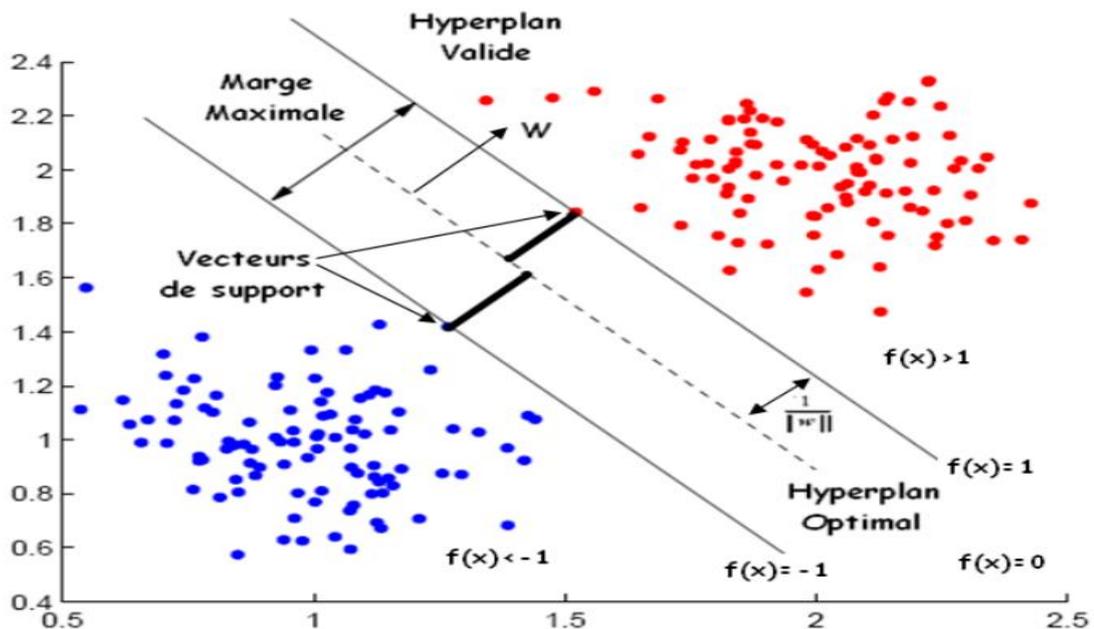


Figure 3-8 Machine à vecteurs de support (SVM)

Pour cette raison, notre objectif devrait être d'obtenir la ligne passant le plus loin possible de tous les points. Ensuite, le processus de l'algorithme SVM est basé sur la localisation de l'hyperplan optimal qui détermine la plus grande distance entre les deux classes et les exemples d'apprentissage. Dans ce cas, la classification devient très dynamique et plus précise.

La figure 3-8 représente les données d'apprentissage  $(x_i, y_i)$  tel que  $x_i \in \mathbb{R}^2$  et  $y_i \in \{-1, 1\}$ . Les points  $x_i$  sont représentés en rouge ou en bleu selon que  $y_i = 1$  ou  $y_i = -1$ , respectivement.

Le principe est de trouver une fonction affine  $f(x) = \langle w * x \rangle + b$  qui permet de diviser le plan de telle manière les points rouges soient d'un côté de la courbe désignée par la fonction «  $f$  » et les bleus de l'autre côté. On cherche «  $f$  » de telle façon que pour chaque «  $x$  » qui se présente, il suffit d'observer le signe de  $f(x)$  pour déterminer la valeur de  $y$  (1 ou -1) non observé.

$$y = \text{sgn}(\langle w * x \rangle + b) \quad (3-10)$$

Où «  $\text{sgn}$  » désigne la fonction signe.

La ligne discontinue est la frontière de décision  $f(x) = 0$  qui sépare l'hyperplan en deux classes. Les deux lignes continues représentent les marges.

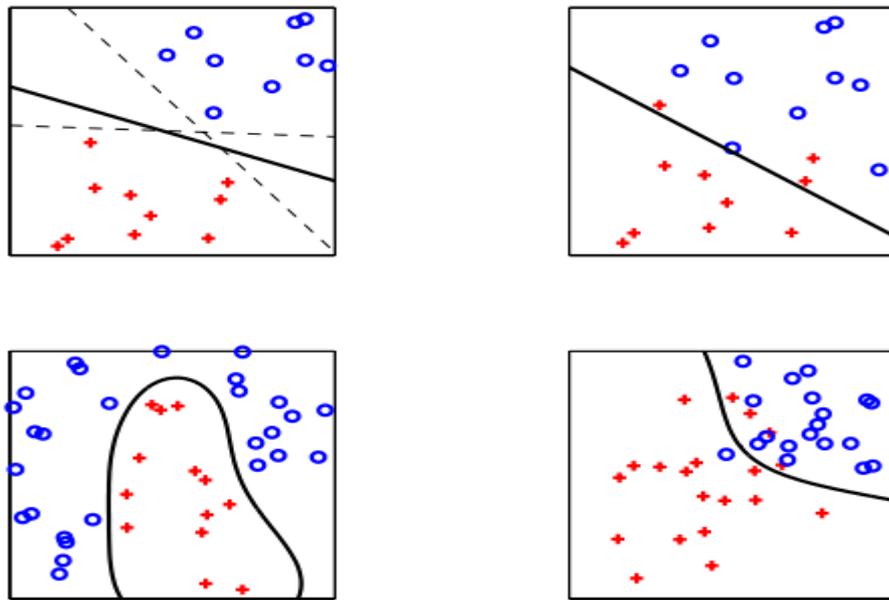
Différentes fonctions sont utilisées et appliquées dans la littérature dans les SVM pour obtenir l'hyperplan de marge optimale. Dans notre cas la fonction gaussien (équation 3-11) est un exemple

de noyau d'une fonction radiale qui donne des résultats satisfaisants [124]:

$$K(x, y) = \exp\left(-\frac{\|x-y\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-11)$$

Les paramètres sigma ( $\sigma$ ) représentent un rôle important dans le comportement du noyau, et doivent être ajustés au problème à résoudre d'une façon correcte.

Si la fonction est au-delà de son estimation, l'exponentielle se comportera presque linéaire et la projection et la classification commence à perdre sa capacité non-linéaire.



**Figure 3-9** Exemples de discrimination binaire entre deux classes et la frontière de décision est représentée en noir

On conclut que : Le principe de base des SVM consiste de ramener le problème de la discrimination à celui, linéaire, de la recherche d'un hyperplan optimal. Deux idées ou astuces permettent d'atteindre cet objectif :

- La première consiste à définir l'hyperplan comme solution d'un problème d'optimisation sous contraintes dont la fonction objectif ne s'exprime qu'à l'aide de produits scalaires entre vecteurs et dans lequel le nombre de contraintes "actives" ou vecteurs supports contrôle la complexité du modèle.
- Le passage à la recherche de surfaces séparatrices non linéaires est obtenu par l'introduction d'une fonction noyau (kernel) dans le produit scalaire induisant implicitement une transformation non linéaire des données vers un espace intermédiaire (feature space) de plus grande dimension. D'où l'appellation couramment rencontrée de machine à noyau ou kernel machine. Sur le plan théorique,

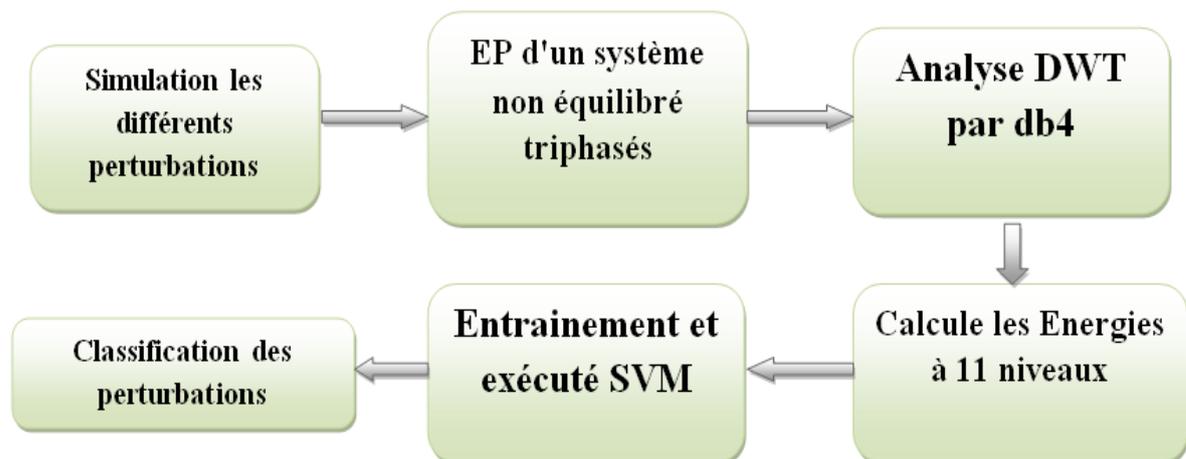
la fonction noyau définit un espace hilbertien, dit auto-reproduisant et isométrique par la transformation non linéaire de l'espace initial et dans lequel est résolu le problème linéaire.

### 3.6.2. La méthode proposé

L'intégration des centrales électriques vertes (énergies renouvelables) connectées au réseau pourrait être une solution pour réduire l'utilisation des combustibles fossiles, mais cela pourrait entraîner la création des problèmes sur la qualité de l'énergie de ces réseaux.

Dans cette partie, une machine à vecteurs de support (SVM) est proposée pour classer et caractériser quelques perturbations typiques sur la qualité de l'énergie existant dans les réseaux électriques telles que la distorsion harmonique, les chutes de tension et les surtensions, a la présence les énergies éoliennes dans les réseaux de transport.

La figure 3-10 montre la structure et les étapes de la classification. Tout d'abord, une analyse de l'écoulement de puissance d'un système non équilibré triphasés est exécutée pour calculer les différentes caractéristiques du réseau électrique (des niveaux de tension et la puissance active et réactive). Ensuite, la transformée en ondelettes discrète est appliqué pour extraire les différents informations produits par l'écoulement de puissance. finalement le SVM classifie et identifier les différents types de perturbation a la base de la courbe de déviation d'énergie de la transformée en ondelettes.



**Figure 3-10** Organigramme et les étapes de classification par SVM

#### 3.6.2.1. Simulation les différents perturbations

Toutes les formes d'onde sont simulées dans MATLAB Simulink avec dans le réseau IEEE 9 jeux de barres [125] représenté par la figure 3-11. Nous avons généré une onde sinusoïdale pure

(fréquence = 60Hz et l'amplitude en p.u). Le réseau électrique choisi est un réseau comprenant 9 J.B. Les J.B 1, 2 et 3 sont des J.B du type PV. Les J.B 5, 6 et 8 sont de types PQ. Et les autres J.B sont des jeux de barres de connexion.

Les possibles causes de la chute de tension comprennent les défauts de court-circuit, le démarrage des moteurs électriques, la mise sous tension des équipements a des charges importantes, la commutation des condensateurs, etc. Où, les courants harmoniques produits par certaines charges non linéaires sur le système, telles que les variateurs de vitesse, les charges de four à arc, les ordinateurs, les copieurs, etc. Le générateur d'énergie éolienne a la possibilité de générer tous ces types de perturbations. De cette manière, nous avons généré différents problèmes qui affectent la qualité de l'énergie électrique en utilisant le modèle de la figure 3-11.

Dans cette étude, les creux tensions et les surtensions causées par un défaut de court-circuit sur le jeu de barre 6 (phase C) et les redresseurs (diode) sont utilisés dans notre étude comme une source d'harmoniques dans le réseau sur le même jeu de barre avec un facteur de puissance de 90% ( $\cos \theta = 0,9$ ).

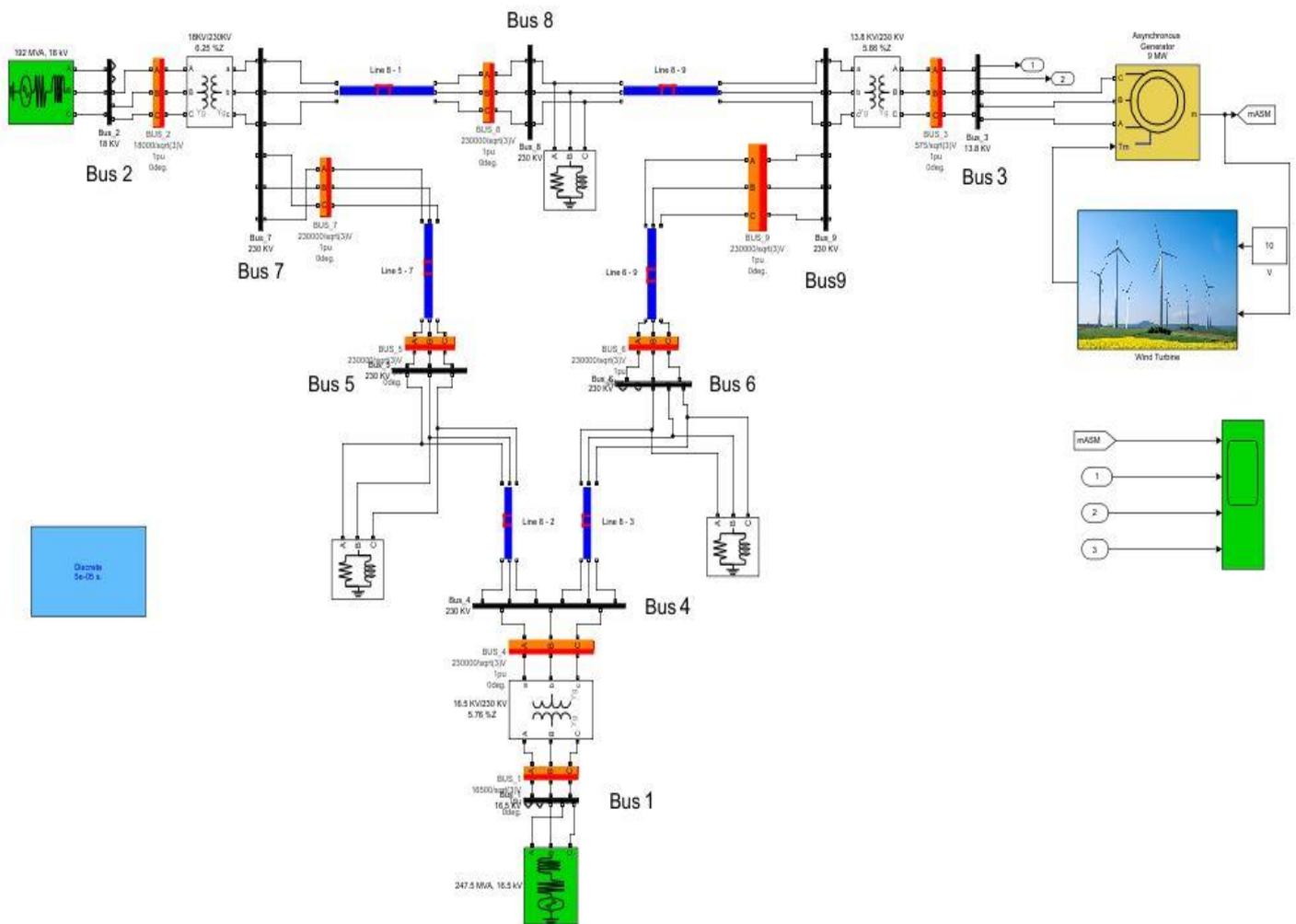


Figure 3-11 Réseau IEEE 9 jeux de barres

### 3.6.2.2. *Écoulement de puissance*

L'analyse d'écoulement de puissance est très importante pour les études, la planification et l'exploitation de puissance dans un réseau électrique composé d'un nombre de générateurs, des lignes et des charges, d'un réseau électrique. Cela permet le planificateur de connaître les conditions de production pour n'importe quel niveau de charge demandé et les niveaux des tensions de ce réseau en régime triphasé (en général équilibré).

Dans les études de stabilité transitoires, il est nécessaire d'avoir le profil de tensions. Les informations principales obtenues à partir d'étude de l'écoulement de puissance comprennent des amplitudes et les angles de déphasage de tensions dans chaque jeu de barre, des puissances actives et réactives sur les lignes de transmission, des puissances actives et réactives dans les jeux de barre de générateur.

Les conditions des défauts peuvent être obtenues à partir des résultats d'études de l'écoulement de puissance par la méthode d'itération de Newton-Raphson.

La méthode de Newton-Raphson est la méthode utile pour l'étude de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques. La convergence n'est pas affectée par le choix du slack bus. Cette méthode commence par des estimations initiales de toutes les variables inconnues telles que l'amplitude et les angles de déphasage de tension aux jeux de barre des charge et les des générateur. Ensuite, une série de Taylor est écrite, les termes d'ordre supérieur étant ignorés, pour chacune des équations de bilan de puissance incluses dans le système d'équations.

Pour un jeu de barre "i" :

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k||Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) = P_i(|V|, \delta) \quad (3-12)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k||Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) = Q_i(|V|, \delta) \quad (3-13)$$

C'est-à-dire que les puissances actives et réactives sont des fonctions de  $(|V|, \delta)$ , Où :

$$|V| = (|V_1|, \dots, |V_n|^T) \text{ et } \delta = (\delta_1, \dots, \delta_n)^T$$

On écrit :

$$P_i(|V|) = P_i(x) \quad (3-14)$$

$$Q_i(|V|) = Q_i(x) \quad (3-15)$$

$$\text{Où : } x = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix}$$

Soit  $P_i$  et  $Q_i$  les puissances aux jeux de barre de charge. Au cours de l'itération "x" :

$$P_i - P_i(x) = 0 \text{ et } Q_i - Q_i(x) = 0 \quad (3-16)$$

En écrivant l'équation (3-16) pour tous les jeux de barre de charge, on obtient :

$$f(x) = \begin{bmatrix} P - P(x) \\ Q - Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} = 0 \quad (3-17)$$

On écrit :

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j11(x) - j12(x) \\ -j21(x) - j22(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

Avec :  $\Delta \delta = (\Delta \delta_2, \dots, \Delta \delta_n)^T$  et  $\Delta |V| = (\Delta |V_2|, \dots, \Delta |V_n|)^T$

$$J(x) = \begin{bmatrix} -j11(x) - j12(x) \\ -j21(x) - j22(x) \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

$J(x)$  est la matrice jacobienne, chaque  $J11, J12, J21, J22$  sont des matrices de  $(n-1) \times (n-1)$ .

$$-J11(x) = \frac{\partial P(x)}{\partial \delta} \quad (3-20)$$

$$-J12(x) = \frac{\partial P(x)}{\partial |V|} \quad (3-21)$$

$$-J21(x) = \frac{\partial Q(x)}{\partial \delta} \quad (3-22)$$

$$-J22(x) = \frac{\partial Q(x)}{\partial |V|} \quad (3-23)$$

Les éléments  $J11, J12, J21, J22$  :

$$\frac{\partial P_i(x)}{\partial \delta_k}, \frac{\partial P_i(x)}{\partial |V_k|}, \frac{\partial Q_i(x)}{\partial \delta_k}, \frac{\partial Q_i(x)}{\partial |V_k|} \quad \text{Où : } i=2 \dots n, \text{ et } k=2 \dots n.$$

D'après les équations (3-12) et (3-13), nous avons :

$$\frac{\partial P_i(x)}{\partial \delta_k} = -|V_i||V_k||Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (i = k) \quad (3-24)$$

$$\frac{\partial P_i(x)}{\partial \delta_k} = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k||Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (i = k) \quad (3-25)$$

$$\frac{\partial P_i(x)}{\partial |V_k|} = |V_i||Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (i \neq k) \quad (3-26)$$

$$\frac{\partial P_i(x)}{\partial |V_k|} = 2|V_i||Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{k=1}^n |V_k||Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (i = k) \quad (3-27)$$

$$\frac{\partial Q_i(x)}{\partial \delta_k} = |V_i||V_k||Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (i \neq k) \quad (3-28)$$

$$\frac{\partial Q_i(x)}{\partial \delta_k} = \sum_{k=1}^n |V_i||V_k||Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (i = k) \quad (3-29)$$

$$\frac{\partial Q_i(x)}{\partial |V_k|} = |V_i||Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) (i \neq k) \tag{3-30}$$

$$\frac{\partial Q_i(x)}{\partial |V_k|} = 2|V_i||Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{k=1}^n |V_k||Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) (i = k) \tag{3-31}$$

Une observation importante peut être faite en ce qui concerne les éléments de la matrice jacobienne. S'il n'y a pas de connexion entre le i<sup>ème</sup> et le k<sup>ème</sup> bus, alors Y<sub>ik</sub> = 0.

Le processus se poursuit jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit remplie.

**Tableau 3-1** Résultats d'écoulement de puissance dans les jeux de barres génératrices

		Phase A				Phase B				Phase C				Totale			
		Tension		puissance		Tension		puissance		Tension		puissance		Tension		puissance	
		p.u	angle	MW	Mvar	p.u	angle	MW	Mvar	p.u	angle	MW	Mvar	p.u	angle	MW	Mvar
J.B 1	Normale (pure)	1.04	0	27.4	-0.67	1.04	-120	27.4	-0.67	1.04	120	27.4	-0.67	1.04	0	82.21	-2.02
	Harmoniques	1.04	0	25.89	2.04	1.04	-120	25.89	2.04	1.04	120	25.89	2.04	1.04	0	77.67	6.13
	défaut (phaseC)	1.04	0	25.72	3.87	1.04	-120	31.33	-15.15	1.04	120	106.98	31.07	1.04	0	164.04	19.80
	Hramo + défaut	1.04	0	8.85	8.81	1.04	-120	12.92	-18.22	1.04	120	106.74	47.96	1.04	0	128.51	38.57
J.B 2	Normale (pure)	1.025	9.54	54.32	-2.36	1.025	-110.46	54.32	-2.36	1.025	129.54	54.32	-2.36	1.025	9.54	162.97	-7.07
	Harmoniques	1.025	9.96	54.33	-1.54	1.025	-110.04	54.33	-1.54	1.025	129.96	54.33	-1.54	1.025	9.96	163	-4.63
	défaut (phaseC)	1.025	14.26	54.33	0.53	1.025	-114.3	54.33	-2.4	1.025	113.85	54.33	6.30	1.141	4.61	163	4.44
	Hramo + défaut	1.025	19.15	54.33	-4.82	1.025	-111.17	54.33	-9.57	1.025	114.46	54.33	2.58	1.0091	7.49	163	-11.81
J.B 3	Normale (pure)	1.025	2.74	28.3	7.61	1.025	-117.26	28.3	7.61	1.025	122.74	28.3	7.61	1.025	2.74	84.90	22.83
	Harmoniques	1.025	3.16	28.33	9.14	1.025	-116.54	28.33	9.14	1.025	123.46	28.33	9.14	1.025	3.46	85	27.42
	défaut (phaseC)	1.025	9.93	28.33	2.43	1.025	-122.03	28.33	20.59	1.025	101.67	28.33	38.26	1.0042	-3.46	85	61.28
	Hramo + défaut	1.025	15.32	28.33	-3.53	1.025	-118.58	28.33	20.94	1.025	100.97	28.32	51.27	0.9942	-0.73	84.99	68.69

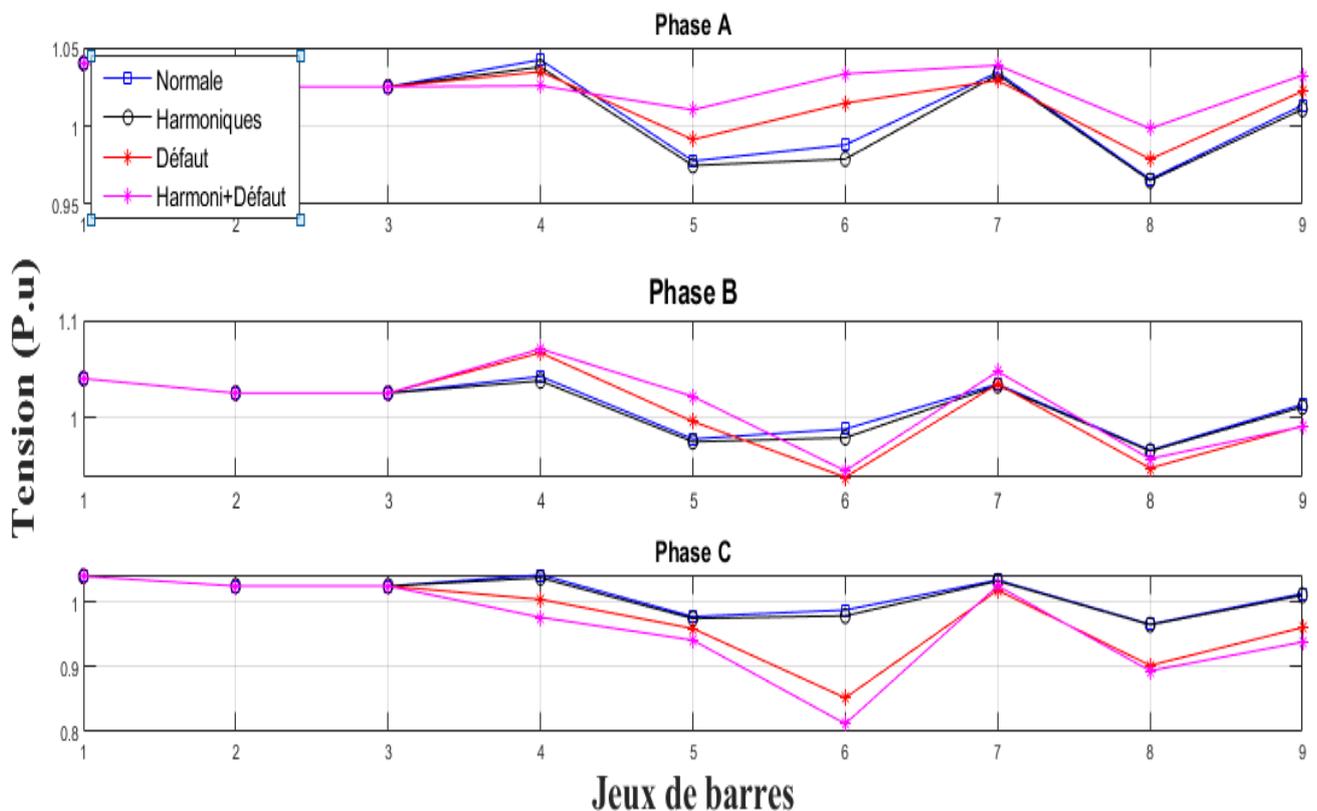
**Tableau 3-2** Résultats d'écoulement de puissance dans les jeux de barres de charges

		Phase A				Phase B				Phase C				Total			
		Tension		puissance		Tension		puissance		Tension		puissance		Tension		puissance	
		p.u	angle	MW	Mvar	p.u	angle	MW	Mvar	p.u	angle	MW	Mvar	p.u	angle	MW	Mvar
J.B 5	Normale (pure)	0.9777	-3.66	41.63	16.58	0.9777	-123.66	41.63	16.58	0.9777	116.34	41.63	16.58	0.9777	-3.66	124.89	49.75
	Harmoniques	0.9748	-3.44	41.67	16.67	0.9748	-123.44	41.67	16.67	0.9748	116.56	41.67	16.67	0.9748	-3.44	125	50
	défaut (phaseC)	0.9713	-1.85	41.67	16.67	0.9957	-125.56	41.67	16.67	0.9093	104.58	41.67	16.67	0.9541	-7.42	125	50
	Hramo + défaut	1.0103	2.33	41.67	16.67	1.0495	-122.4	41.67	16.67	0.9413	105.86	41.67	16.67	0.9933	-4.48	125	50
J.B 6	Normale (pure)	0.9879	-4.73	29.88	9.93	0.9879	-124.73	29.88	9.93	0.9879	115.27	29.88	9.93	0.9879	-4.73	89.64	29.78
	Harmoniques	0.9789	-3.86	28.47	13.8	0.9789	-123.86	28.47	13.8	0.9789	116.14	28.47	13.8	0.9789	-3.86	85.4	41.4
	défaut (phaseC)	1.0646	-0.74	30	10	0.9382	-124.77	30	10	0.7239	86.77	30	10	0.8835	-10.62	90	30
	Hramo + défaut	1.0933	2.09	28.47	13.8	0.9448	-119.96	28.46	13.8	0.5869	80.18	28.45	13.8	0.8369	-7.67	85.38	41.39
J.B 8	Normale (pure)	0.9661	-1.72	33.42	11.65	0.9661	-121.72	33.42	11.65	0.9661	118.28	33.42	11.65	0.9661	-1.72	100.25	34.94
	Harmoniques	0.9651	-1.1	33.33	11.67	0.9651	-121.1	33.33	11.67	0.9651	118.9	33.33	11.67	0.9651	-1.1	100	35
	défaut (phaseC)	0.9788	4.54	33.33	11.67	0.9475	-126.1	33.33	11.67	0.9023	99.21	33.33	11.67	0.9276	-7.09	100	35
	Hramo + défaut	0.9984	10.31	33.33	11.67	0.9572	-122.34	33.33	11.67	0.8940	99.2	33.33	11.67	0.9273	-3.54	100	35

L'étude de l'EP a donné les résultats présentés dans les tableaux 3-1 et 3-2, où le premier tableau indique les résultats dans les jeux de barres génératrices et le deuxième montre les résultats dans les jeux de barres des charges.

La convergence est obtenue en 4 itérations.

Par observation des résultats présentés dans les tableaux, les niveaux de tension (module et angle) les puissances actives  $P$ , réactives  $Q$  générées sont, nettement, différentes dans tous les cas étudiés.



**Figure 3-12** Profile de tension des trois phases dans les jeux de barres

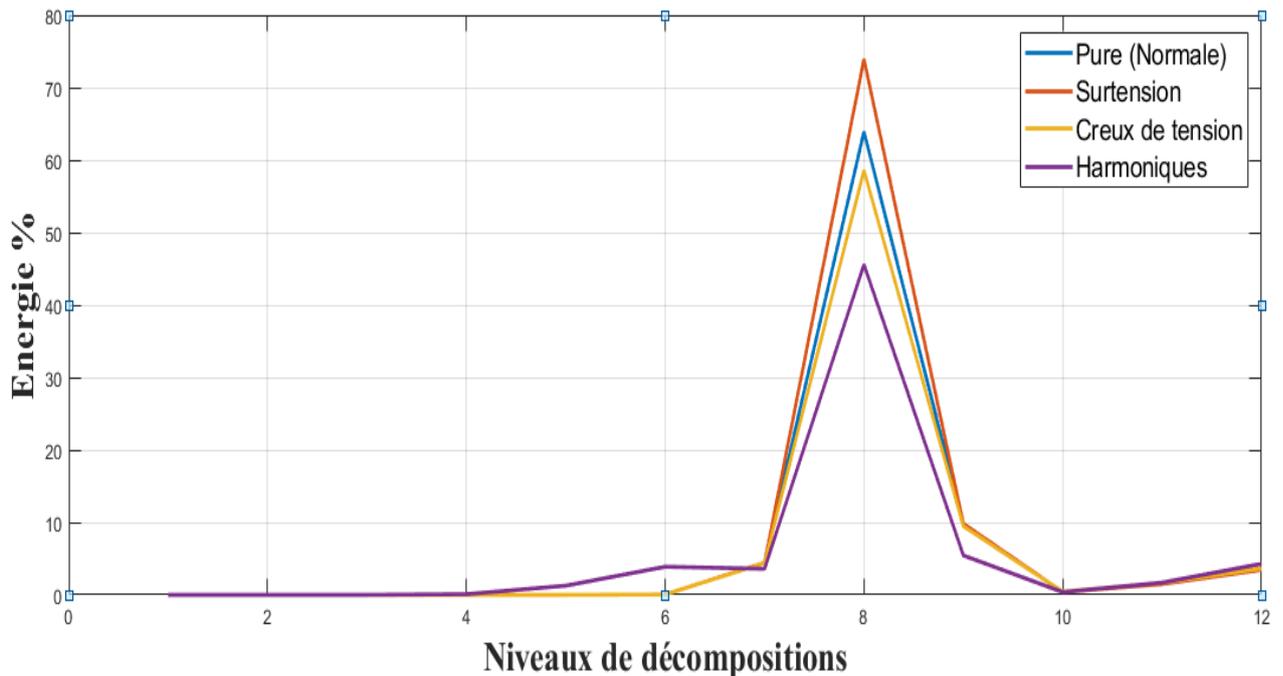
On remarque que la puissance  $P$  générée au J.B 1 est réduite de 82.21 [MW] à 77.67 [MW], par contre la puissance réactive  $Q$  générée au J.B 1 est augmenté de -2.02 [MVA<sub>r</sub>] à 6.13 [MVA<sub>r</sub>], dans le cas de présence des harmoniques. Et dans les autres cas (défaut et défaut + harmonique) il y a une augmentation dans la puissance active ainsi que la puissance réactive. Même remarque dans les autres jeux de barres génératrices.

Dans les cas où il y a un défaut dans **la phase C**, on observe qu'il y a un déséquilibre dans tous les points de ce réseau. La figure 3-12 montre le profile de tension dans tous les jeux de barres dans les 4 cas de simulation.

### 3.6.2.3. Analyse par DWT

L'ondelette mère Daubechies «db4» est utilisé pour exécuter la transformée en ondelette discrète DWT avec 12 niveaux de décomposition.

La figure 3-13 montre la distribution d'énergie dans les différentes perturbations à chaque niveau de décomposition.



**Figure 3-13** La courbe énergétique de la DWT

Les pourcentages d'énergie dépendent de nombreux facteurs, la valeur de la perturbation, la durée, l'emplacement de cette perturbation (dans quel jeu de barre) et également les paramètres du système de ce réseau comme les lignes, la charge, la source de tension... etc.

Cependant, pour conserver les informations complètes, les valeurs de la courbe Std-MRA de tous les niveaux de MRA sont considérées comme des entrées de SVM pour classer les différentes perturbations de la qualité d'énergie.

### 3.6.2.4. Résultats des machines à vecteurs de support

À partir des signaux simulés, et les énergies calculés a travers les différents niveaux de décomposition a l'aide de la DWT. Ces résultats obtenus sont appliqué comme des entrées du SVM. De cette manière, les données d'entrée sont normalisées de 500 cas pour l'entraînement et l'apprentissage et un ensemble de 300 cas le test.

Le structure des machines à vecteurs de support se compose de 2 ou 3 entrées (niveau d'énergie),

par exemple [Ed6 - Ed8] ou [Ed6 - Ed8- Ed9] comme illustré dans le tableau 3-3. Les variables de sortie du SVM sont désignées comme une plage de valeurs de 1 à 6, ce qui correspond aux différents problèmes de la qualité d'énergie.

A: «1» correspond les surtensions ;

B: «2» correspond les creux de tension ;

C: «3» correspond les harmoniques ;

D: «4» correspond les surtensions + harmonique ;

E: «5» correspond les creux de tension + harmonique ;

F: «6» correspond un signale pure (sans problème) ;

### A. Machines à vecteurs de support Binaire

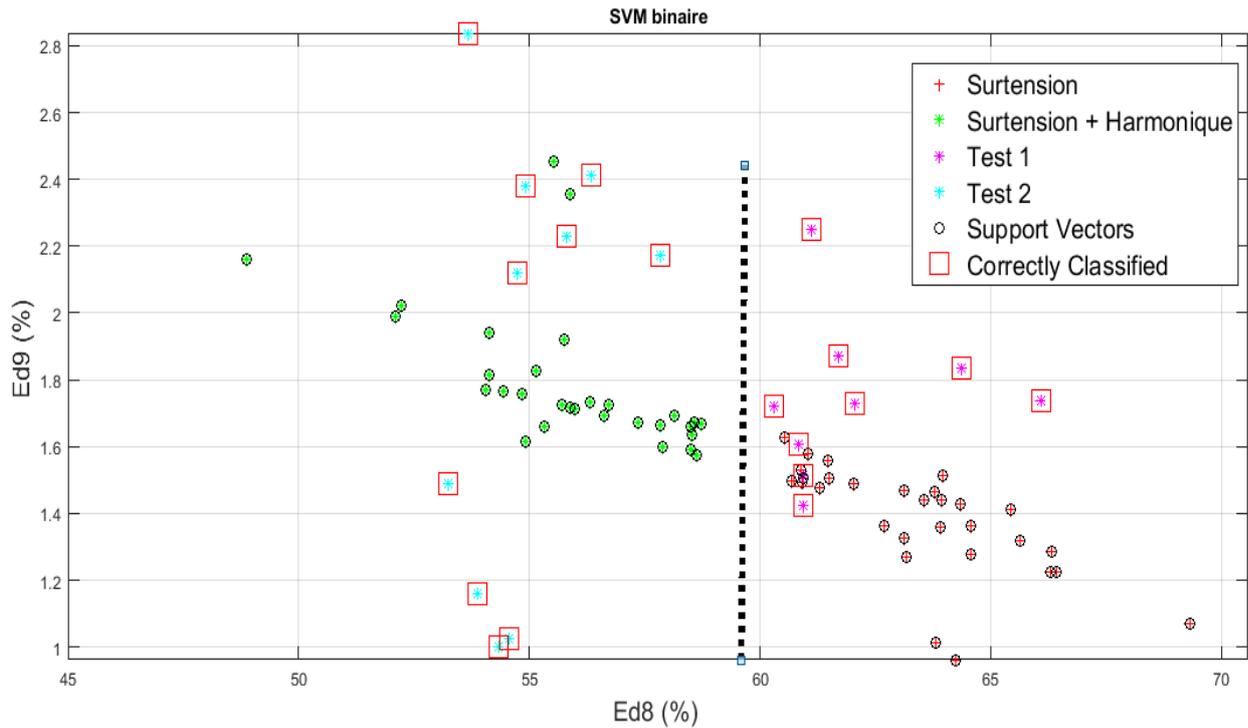
A l'origine les SVM sont se qu'on appelle des classificateurs binaires. Dans cette partie on va faire une classification binaire entre les différents cas simulés et le tableau 3-3 montre le pourcentage de classification par le SVM

**Tableau 3-3** Pourcentage des échantillons hors Classification par le SVM

<i>Entrées du SVM</i>	<i>Ed 6 &amp; Ed 9</i>	<i>Ed 8 &amp; Ed 6</i>	<i>Ed 8 &amp; Ed 9</i>	<i>Ed 6 &amp; Ed 8 &amp; Ed 9</i>
<i>SVM Modèles</i>				
<b>A &amp; B</b>	0 %	2 %	2 %	0 %
<b>B &amp; C</b>	0 %	0 %	0 %	0 %
<b>C &amp; E</b>	27 %	7 %	10 %	0 %
<b>C &amp; D</b>	16 %	13 %	21 %	9 %
<b>D &amp; E</b>	12 %	3 %	5 %	0 %
<b>Moyenne</b>	12 %	5 %	7.6 %	1.8 %

A partir de ce tableau on remarque que le pourcentage des échantillons hors Classification dans le cas où il y a trois valeurs d'entrés (Ed 6 & Ed 8 & Ed 9) est de moyenne de 1.8% par contre dans les autres classes le pourcentage est au-delà de 5%. Cela signifie que l'efficacité et la précision de la classification dépend des informations d'entrée du SVM.

La figure 3-14 montre la classification par le SVM binaire entre deux classes (A & D), où la ligne noire pointé au milieu de la figure représente l'hyperplan optimal du SVM qui sépare les données et maximiser la distance entre les deux classes, afin d'obtenir une classification précise.



**Figure 3-14** Classification par SVM binaire entre deux classes (surtension & surtension + Harmoniques)

### B. Machines à vecteurs de support Multi-classe (ECOC-SVM)

Les méthodes les plus courantes pour dessiner une classification à multi-classe consistent à déterminer un ensemble de classificateurs binaires et les combiner. Par conséquent l'origine des SVM sont se qu'on appelle des classificateurs binaires. Par contre, si un classificateur multi-classes est nécessaire comme le cas de la classification les perturbations de la qualité d'énergie, en particulier lorsque les signaux comprennent plus d'une perturbation ou plusieurs problèmes, dans cette situation, le SVM doit être dessiné à plusieurs classes.

L'adaptation des SVM bi classes au cas multiclasse peut se faire de trois façons différentes. Le choix va dépendre de la taille du problème.

- L'approche un contre tous consiste à entraîner un SVM bi-classe en utilisant les éléments d'une classe contre tous les autres. Il s'agit de résoudre de l'ordre de problèmes SVM chacun de taille  $n$ .
- L'approche un contre un : consiste à entraîner 2 SVM sur chacun des couples de classes, puis à décider la classe gagnante soit par un vote majoritaire soit en post traitent les résultats grâce à l'estimation de probabilités a posteriori. Le nombre de classificateurs SVM à entraîne peut être

réduit en utilisant un codage astucieux pour les classes à travers un code correcteur d'erreur ou un graphe directe acyclique (DAGSVM).

- L'approche globale consiste à traiter le problème en une seule fois. Cela peut se faire en posant formellement le problème.

Il existe cependant des méthodes qui permettent d'étendre ce schéma au cas de plusieurs classes. Ces méthodes sont applicables à tous classificateurs. Dans ce sens, les codes de sortie avec correction d'erreur (Error-Correcting Output Codes "ECOC") représentent un cadre efficace pour traiter ce type de problèmes [126]. Une machine à vecteurs de support est combiné avec un classificateur SVM est proposée pour classer et caractériser les différents perturbations qu'on a vue auparavant.

#### ➤ **Error-Correcting Output Codes "ECOC"**

La technique multi ECOC est basée sur une réduction des problèmes de classification multi-classe à un ensemble et une combinaison de SVM binaire où certains schémas de décodage et conception de codage sont utilisés pour la prédiction des résultats de classification selon des prédictions SVM binaires. Plus de détails dans la référence [126], [127].

L'approche prédominante pour traiter de tels problèmes consiste à reformuler le problème multiclasse a une série de tâches de classification binaires plus petites, appelées « binarisation de classe » de cette manière, les problèmes à deux classes peuvent être résolus par des classificateurs binaires et les résultats peuvent ensuite être combinés afin de fournir une solution au problème multiclasse d'origine.

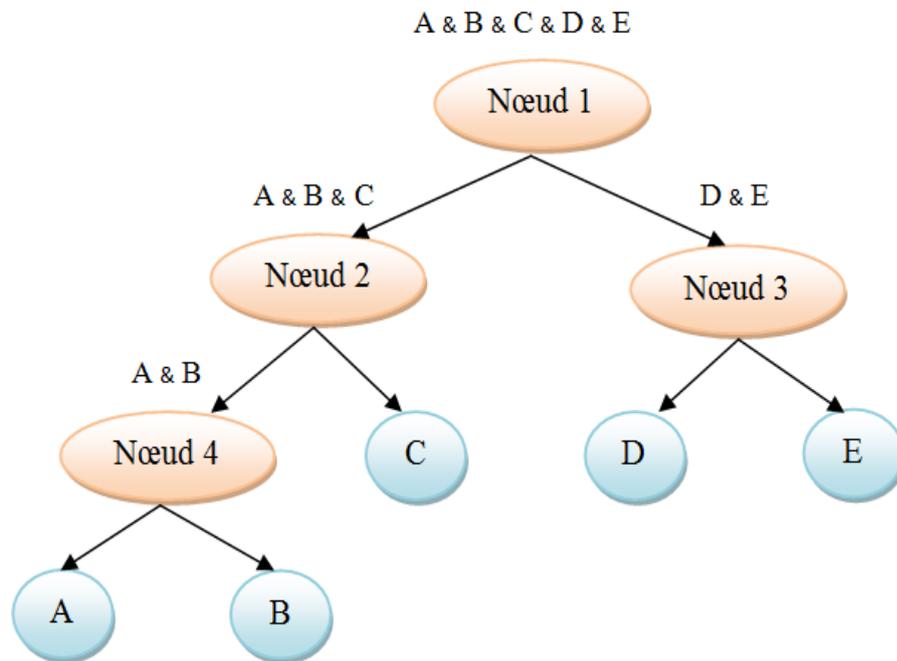
Parmi les méthodes proposées pour approcher la binarisation des classes, la stratégie des codes de sortie de correction d'erreur (ECOC).

ECOC est une structure ou bien un cadre général pour les approches de binarisation de classe qui améliore la capacité de généralisation des classificateurs binaires. La base du cadre ECOC est de décomposer un problème multiclasse en un plus grand nombre de problèmes binaires (Figure 4-2). De cette manière, chaque classificateur est entraîné sur un problème à deux méta-classes, où chaque méta-classe consiste en certaines combinaisons des classes d'origine. Dans un arbre binaire à k classes, il y a toujours  $k-1$  nœuds.

La méthode ECOC peut être décomposée en deux étapes : l'encodage et le décodage. L'objectif de l'étape de codage est de concevoir une matrice de décomposition discrète (code-matrix) pour un problème donné. Chaque ligne de la matrice codée, appelée mot de code, est une séquence de bits

représentant chaque classe, où chaque bit identifie l'appartenance de la classe à un classificateur.

Dans l'étape de décodage, la décision de classification finale est obtenue sur la base des sorties de classificateurs binaires.



**Figure 3-15** Arbre binaire d'un problème à cinq classes ( $k=5$ )

Étant donné un échantillon de test non étiqueté, chaque classificateur binaire vote pour l'une des deux méta-classes utilisées dans l'entraînement.

Ce qui suit décrit brièvement quelques notations utilisées dans cette partie:

$T = \{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$ . Un ensemble d'entraînement.

Où  $x_i \in \mathbb{R}^n$ ; et chaque étiquette  $y_i$  est un entier appartenant à

$Y = \{w_1, w_2, \dots, w_c\}$ , où "c" est le nombre de classes

$h = \{h_1, h_2, \dots, h_L\}$  : Un ensemble de classificateurs binaires "L".

Le but des méthodes de binarisation des classes est d'obtenir une fonctionnalité de vecteur "x" comme un vecteur d'entrée, et de l'affecter à une étiquette de classe à partir de "Y".

La base du cadre ECOC consiste à concevoir un mot de code (codeword) pour chacune des classes. Cette méthode utilise une matrice "M" de {1, 0} valeurs de taille  $c \times L$ , où "L" est le nombre de mots de code de chaque classe. Cette matrice est interprétée comme un ensemble de problèmes "L" d'apprentissage binaires, un pour chaque colonne. C'est-à-dire que chaque colonne correspond à un classificateur binaire, appelé dichotomiseur " $h_j$ ", qui sépare l'ensemble des classes en deux

métaclasse. L'instance "x", appartenant à la classe "i", est une instance positive du classificateur "i<sup>em</sup>" si et seulement si  $M_{ij} = 1$  et est une instance négative si et seulement si  $M_{ij} = 0$ .

Il existe de nombreuses façons de concevoir le code de sortie de correction d'erreurs. Lorsque le nombre de classes k est petit ( $3 < k < 7$ ), on peut utiliser des codes exhaustifs. Chaque code a une longueur de  $2^{k-1}-1$ .

- La première ligne ne contient que les 1s ;
- La deuxième se compose de  $2^{k-2}$  de zéros suivis de  $2^{k-2}-1$  de 1 ;
- La troisième se compose de  $2^{k-3}$  de zéros, suivis de  $2^{k-3}$  de 1s, suivis de  $2^{k-3}$  zéros, suivis de  $2^{k-3}-1$  de 1s ;

**Tableau 3-4** Le code exhaustif d'un problème à cinq classes (k=5)

Ligne	Mot de code (codeword)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1
4	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1
5	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0

La figure 3-15 montre un code de sortie de correction d'erreurs de 15 bits pour un problème à cinq classes. Chaque classe se voit attribuer une chaîne binaire unique de longueur 15. La chaîne est également appelé mot de code. Par exemple, la classe 2 au mot de code 000000001111111.

Nous définissons un code correcteur d'erreurs comme une matrice de valeurs binaires telle que la matrice présentée dans le tableau 3-4. La longueur d'un code est le nombre de colonnes du code. Le nombre de lignes dans le code est égal au nombre de classes dans le problème d'apprentissage multiclasse.

La base du cadre ECOC consiste à concevoir un mot de code (codeword) pour chacune des classes. Cette méthode utilise une matrice "M" de {1, 0} valeurs de taille  $c \times L$ , où "L" est le nombre de mots de code de chaque classe. Cette matrice est interprétée comme un ensemble de problèmes "L" d'apprentissage binaires, un pour chaque colonne. C'est-à-dire que chaque colonne correspond à un classificateur binaire, appelé dichotomiseur "h<sub>j</sub>", qui sépare l'ensemble des classes en deux métaclasse. L'instance "x", appartenant à la classe "i", est une instance positive du classificateur "i<sup>em</sup>" si et seulement si  $M_{ij} = 1$  et est une instance négative si et seulement si  $M_{ij} = 0$ .

**Tableau 3-5** Pourcentage des échantillons hors Classification par le ECOC-SVM

	<i>Ed 8 &amp; Ed 6</i>	<i>Ed 6 &amp; Ed 8 &amp; Ed 10</i>	<i>Tous les niveaux d'énergie (Ed1 - Ed11)</i>
<b>Echantillons hors Classification ECOC-SVM</b>	10.8 %	10 %	3.2 %

Les tableaux 3-5 et 3-6 démontrent la capacité de la méthode proposée à identifier et de classer les différentes perturbations avec des précisions très élevées à la moyenne de 99,2% par rapport aux autres méthodes.

**Tableau 3-6** Pourcentage de classification de chaque type de perturbation par ECOC-SVM et d'autres classificateurs.

<i>Type de perturbation</i>	<i>ST avec CFDT [128]</i>	<i>S-transform et DAG-SVMs [81]</i>	<i>Méthode Proposé ECOC-SVM</i>
A	98.66 %	98.5 %	100 %
B	97.33 %	99 %	100 %
C	100 %	99.5 %	98 %
D	98 %	97 %	98 %
E	-	99.5 %	100 %
Moyenne	98.49 %	98.7 %	99.2 %

Les performances et l'efficacité de la méthode et de l'algorithme proposés sont également comparées avec d'autres classificateurs existants. Ces méthodes sont basés sur la transformée en ondelettes.

**Tableau 3-7** Précision de classification de la méthode proposée par rapport aux autres méthodes.

<i>Méthodes</i>	<i>Classification</i>
Méthode proposé (ECOC-SVM)	99.20 %
Réseau de neurone avec DWT et Logique floue [77]	98.17 %
Ondelettes et Logique floue [78]	98.02 %
Ondelettes et SVM [75]	93.43%
PSO-ELM [82]	97.60%
Fast Dyadic ST avec CFDT [128]	98.66%

La méthode proposée donne une précision satisfaisante de 99,2% par rapport aux méthodes bien connues et montre que chaque perturbation de la qualité de l'énergie présente des écarts

spécifiques par rapport à la forme d'onde sinusoïdale pure, ce qui permet de reconnaître et de spécifier le type de perturbation générée par le générateur éolien.

### 3.6.2.5. Classification des perturbations en présence des énergies éoliennes

Dans cette partie, on va classer les différents perturbations générées par les énergies renouvelables par la méthode ECOC-SVM. Un simple générateur éolien (centrale éolienne) de 85 MW était remplacé par l'un des générateurs existants dans le réseau précédent (Figure 3-11). Cette reconfiguration peut perturber les paramètres du réseau et créer quelques perturbations sur la qualité d'énergie (Harmoniques et les divers perturbations sur le profil de tension), en remplaçant le générateur dans le jeu de barre 3 par un générateur d'énergie éolienne avec une production d'électricité de 85 MW.

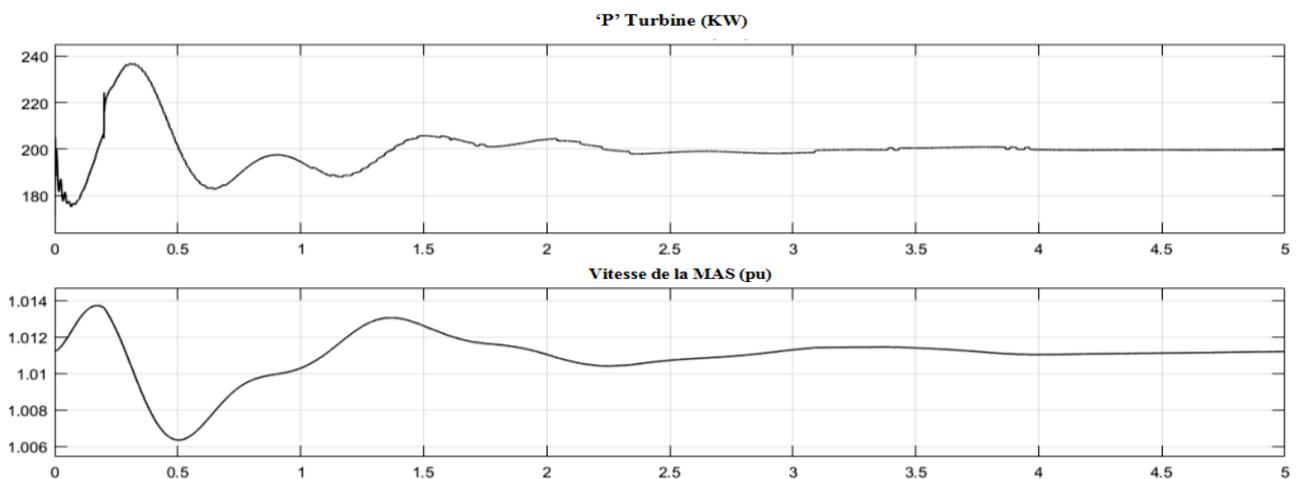


Figure 3-16 La puissance mécanique de la turbine et la vitesse de la MAS

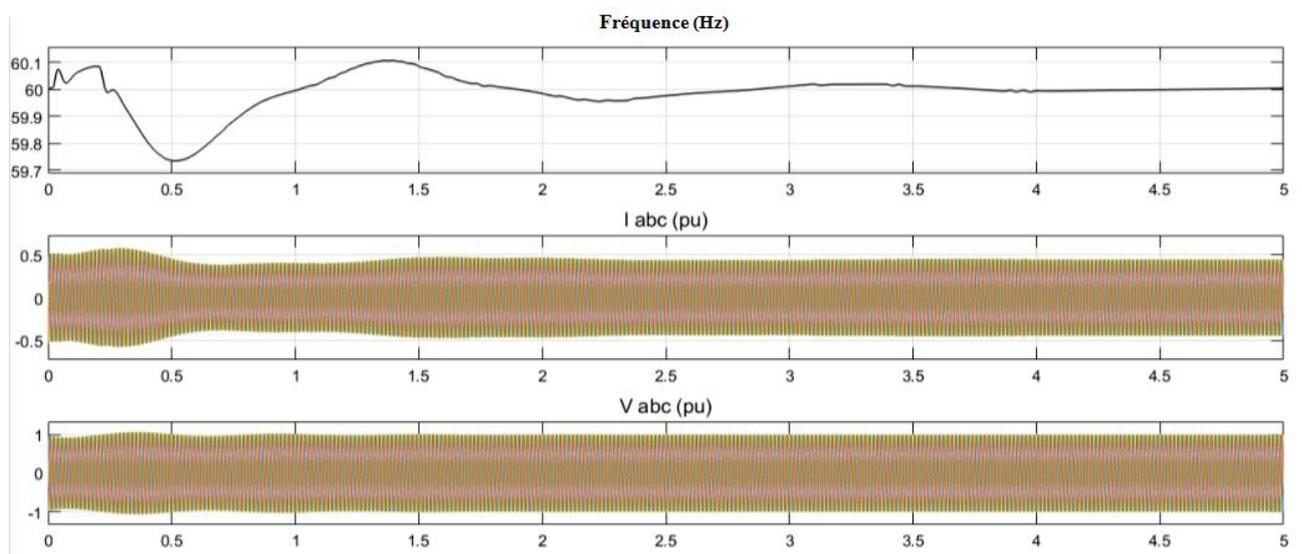


Figure 3-17 Profile de fréquence, de courant et de la tension dans le J.B 3

Les figures 3-16 et 3-17 représentent les résultats de simulation, où la figure 3-16 représente la puissance mécanique de la turbine et la vitesse de la machine asynchrone. D'autre part, la figure 3-17 présente la forme d'onde de la fréquence, le courant et la forme d'onde de la tension au niveau de jeu de barre 3.

**Tableau 3-8** Résultats d'écoulement de puissance sans et en la présence l'énergie éolienne

		Phase A				Phase B				Phase C				Total			
		Tension		Puissance		Tension		Puissance		Tension		Puissance		Tension		Puissance	
		p.u	angle	MW	Mvar	p.u	angle	MW	Mvar	p.u	angle	MW	Mvar	p.u	angle	MW	Mvar
J.B 3	Sans éolienne	1.025	2.74	28.3	7.61	1.025	-117.26	28.3	7.61	1.025	122.74	28.3	7.61	1.025	2.74	84.90	22.83
	Avec éolienne	1.02	1.11	28.33	5.14	1.02	-116.1	28.33	5.14	1.02	123.5	28.33	5.14	1.02	1.15	85	15.42
J.B 8	Sans éolienne	0.9661	-1.72	33.42	11.65	0.9661	-121.72	33.42	11.65	0.9661	118.28	33.42	11.65	0.9661	-1.72	100.25	34.94
	Avec éolienne	0.9555	2.1	33.99	10.41	0.9555	-117.9	33.99	10.41	0.9555	121.96	33.99	10.41	0.9555	1.88	101.97	31.23
J.B 6	Sans éolienne	0.9879	-4.73	29.88	9.93	0.9879	-124.73	29.88	9.93	0.9879	115.27	29.88	9.93	0.9879	-4.73	89.64	29.78
	Avec éolienne	0.9620	3.27	29.77	8.96	0.9620	-115.84	29.77	8.96	0.9620	122.90	29.77	8.96	0.9620	3.52	89.33	29.6

Le tableau 3-8 représente les résultats d'écoulement de puissance avec et sans énergie éolienne au niveau des jeux de barres génératrices dans les trois phases.

Dans cette partie, on va diviser le signal produit par le générateur éolienne au niveau de jeu de barre 3 en 3 parties (séries des signaux) :

1<sup>er</sup> série de 0s jusqu'a 0,5s ;

2<sup>eme</sup> série de 0.5s jusqu'a 1s ;

3<sup>eme</sup> série de 1.5s jusqu'a 5s ;

Après cette sélection, on va essayer de détecter les différentes perturbations existant sur ce signal à l'aide de la méthode de la figure 3-10, basé sur le classificateur ECOC-SVM. Le tableau 3-9 montre les résultats de classification.

**Tableau 3-9** résultats de classification de perturbations générées par l'éolienne à l'aide de l'ECOC-SVM

La série	[0 – 0.5 s]	[0.5 – 1 s]	[1.5 – 5 s]
<b>Classes de la perturbation</b>	D "surtensions + harmonique"	E "creux de tension + harmonique"	F "un signale pure"

### **3.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a intéressé à la présentation et l'application de la transformée par ondelettes sur les différentes perturbations typiques existants dans les réseaux pour la détection et l'identification, afin d'extraire des informations liés a ces perturbations. Les résultats montrent que chaque perturbation de la qualité de l'énergie présente des propriétés spécifiques par rapport à la forme d'onde sinusoïdale pure, ce qui permet de reconnaître et de spécifier le type de perturbation

Ensuite, nous avons défini une méthode basée sur les machines à vecteur de support permettant de détecter et de classifier les différentes perturbations typiques existant dans les réseaux électriques, en prenant en compte les perturbations générés par les énergies éoliennes.

D'autre part, la méthode proposée est capable de reconnaître et de classer efficacement différents types de perturbations de puissance avec 99,2% par rapport aux méthodes bien connues.

## Chapitre 04

# LES ONDELETTES ET LES HARMONIQUES

---

### 4.1. Introduction

L'utilisation importante des structures d'électronique de puissance dans les réseaux électriques est due à leurs multiples fonctions. Cependant, à cause de leurs éléments commutatifs, ils génèrent des harmoniques de tension et de courant qui peuvent engendrer nombreux problèmes perturbants. Afin d'éviter et d'atténuer les perturbations harmoniques, une bonne connaissance de leur génération et de leur propagation est nécessaire.

Une meilleure compréhension des mécanismes du transfert harmonique peut rendre l'atténuation des harmoniques plus efficace et peut être utilisée pour l'optimisation de filtres et de manière plus générale, l'amélioration de la conception de chaînes électriques. Et comme nous avons signalé dans le chapitre 3, il existe cependant certaines techniques de l'intelligence artificielle basée sur les ondelettes. Ils peuvent nous aider à classifié ces harmoniques. La théorie de la transformée par ondelettes présentent des avantages par rapport aux méthodes traditionnelles pour analyser des situations physiques où le signal contient des discontinuités ou des signaux non stationnaires. La méthode présentée dans ce chapitre utilise la transformée par ondelette pour la classification et pour le filtrage de ces harmoniques.

Parmi toutes les perturbations citées auparavant, Dans ce chapitre on s'intéresse plus aux harmoniques. Ce chapitre débute par une méthode classificatrice basé sur la transformée en ondelette qui a consisté à classifier quelques générateurs d'harmoniques à l'aide des réseaux de neurones. Ensuite, on va essayer de faire une étude comparative entre trois types de filtrage. Afin d'évaluée les ondelettes et leurs comportements en présence des harmoniques. Les méthodes de filtrage ont été évaluées en s'appliquant à des données simulées par un model de simulink matlab.

### 4.2. Harmoniques

Pour qu'un réseau électrique soit de bonne qualité, sa tension doit être sinusoïdale triphasée équilibrée afin de former un réseau électrique triphasé équilibré. Selon le pays, la fréquence de ligne est généralement de 50 Hz ou 60 Hz. En pratique, les formes d'onde de tension et de courant ne sont

pas sinusoïdales, surtout lorsque des charges non linéaires sont présentes et engendrent des harmoniques dans le réseau électrique. Les harmoniques présents sur le réseau de distribution électrique proviennent majoritairement des charges non linéaires qui génèrent des courants harmoniques mais ils peuvent aussi être créés par les sources génératrices de tension.

Il est à noter qu'il existe aussi des perturbations sur des rangs harmoniques non multiple entier du fondamental. Ces derniers se dénomment inter ou infra harmoniques. Les inter-harmoniques sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas des fréquences entières de celle du fondamental. Les infra harmoniques sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental.

### 4.3. Effets des harmoniques dans les réseaux électrique

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent provoquer l'échauffement des transformateurs, câbles, moteurs, générateurs. Il en va de même pour les condensateurs raccordés à la même alimentation que les dispositifs générateurs d'harmoniques. Les afficheurs des appareils électroniques et les éclairages se mettent à papilloter. Les disjoncteurs peuvent déclencher.

Les ordinateurs dysfonctionner et les instruments de mesure donnent des valeurs erronées. La déformation des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes ou des valeurs efficaces induisant des échauffements et donc des pertes supplémentaires.

En générale les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types : des effets à court terme et des effets à long terme.

#### ➤ à court terme :

- Déclenchement intempestif des circuits de protection ;
- Vibrations, bruits acoustiques dans les transformateurs ;
- Dysfonctionnements des dispositifs de commande ou de régulation ;
- Effet de flicker au niveau des éclairages ;
- Pertes de précision dans les appareils de mesure ;
- Vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques dus aux champs tournants harmoniques ;

➤ *à long terme :*

- Echauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipements ;
- Pertes supplémentaires dans les transformateurs ou les inductances dues à l'effet de Peau dans le cuivre ;
- Vieillesse prématuré des moteurs électriques, dû à la différence importante de la vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor ;
- Vieillesse mécanique des équipements à cause des vibrations et des couples pulsatoires ;
- Echauffements supplémentaires des condensateurs par conduction et par hystérésis ;
- Risque d'excitation le phénomène de résonance ;

#### 4.4. Classification de quelques générateurs des harmoniques

Cette partie présente une méthode pour la classification de quelques générateurs d'harmoniques en utilisant la transformation en ondelettes pour l'identification de ces harmoniques.

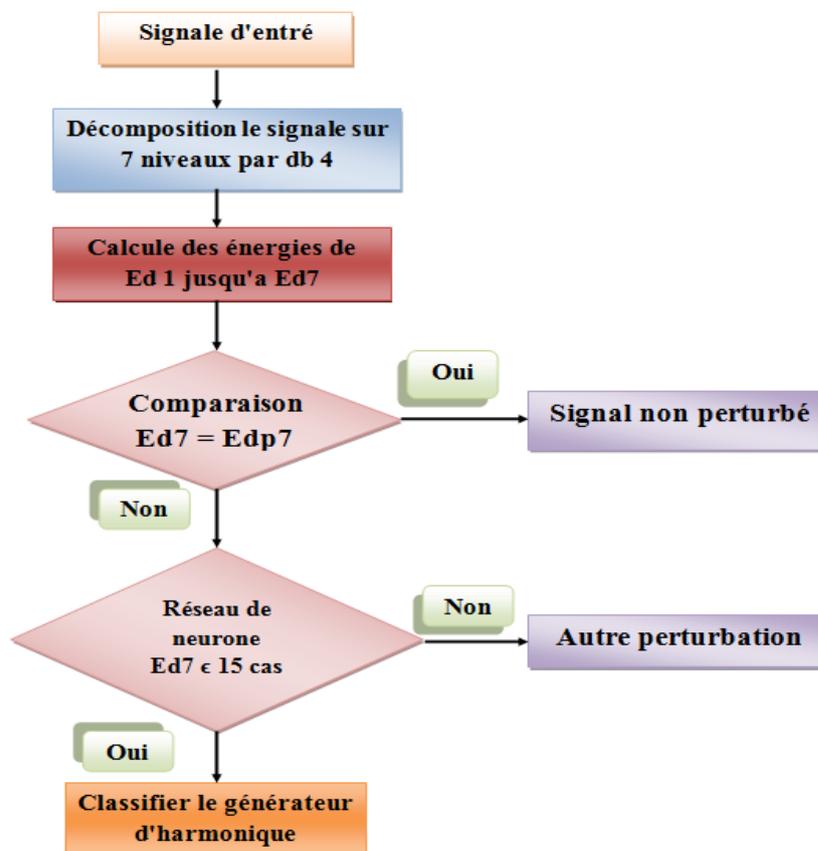


Figure 4-1 Organigramme de classification

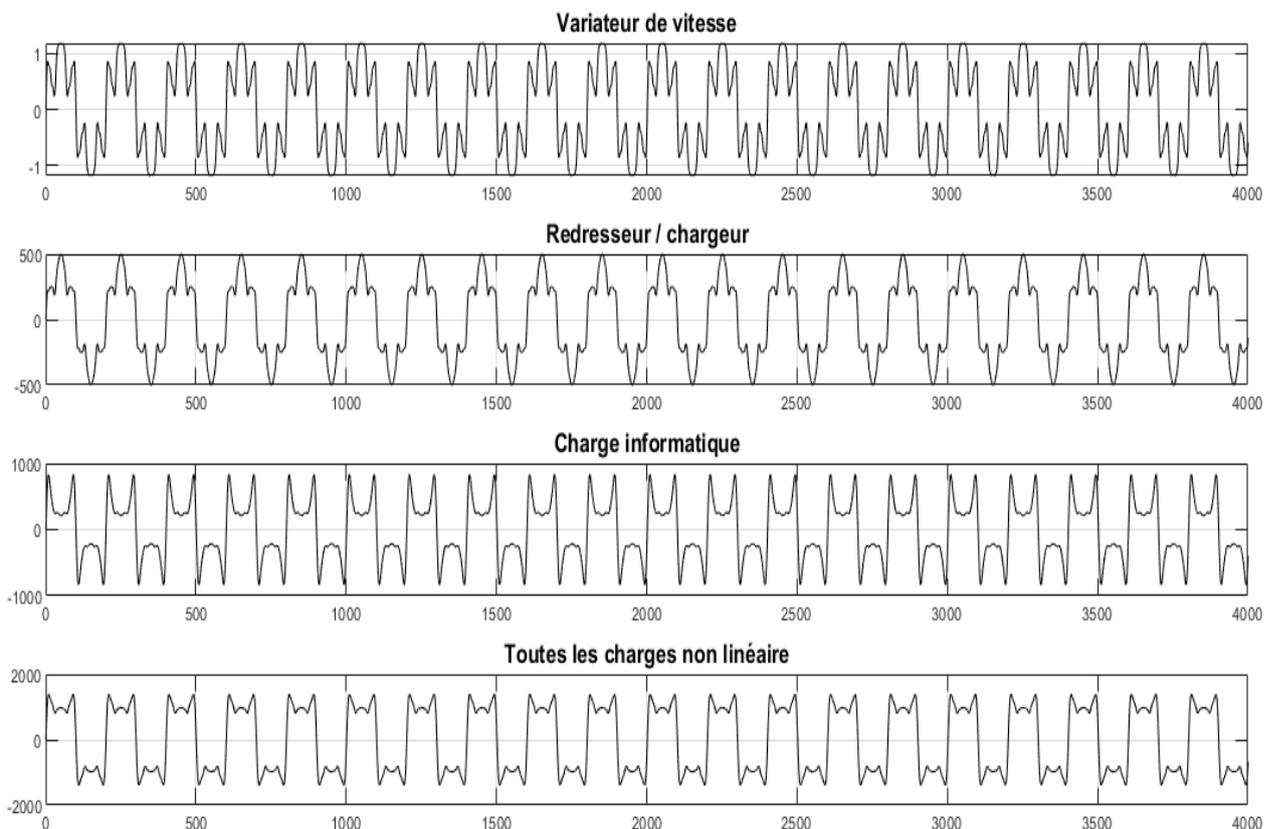
La transformée en ondelettes, qui a la capacité d'analyser ce type des problèmes dans la qualité d'énergie simultanément dans le domaine temporel et fréquentiel, est utilisée pour extraire les caractéristiques des perturbations en décomposant le signal à l'aide d'une analyse multi-résolution.

L'algorithme utilisé est basé sur le calcul de l'énergie du signal à l'aide de l'ondelette db4 au niveau 7 qui permettent de calculer la décomposition et les énergies de ces signaux.

Avec deux couches cachées le réseau de neurone est utilisé pour la classification de ces générateurs d'harmoniques. Les entrées de ce réseau sont définies en fonction des énergies de tous ces signaux. Le nombre de neurones de la première couche cachée est sélectionné égal à 28 et 10 dans la deuxième couche.

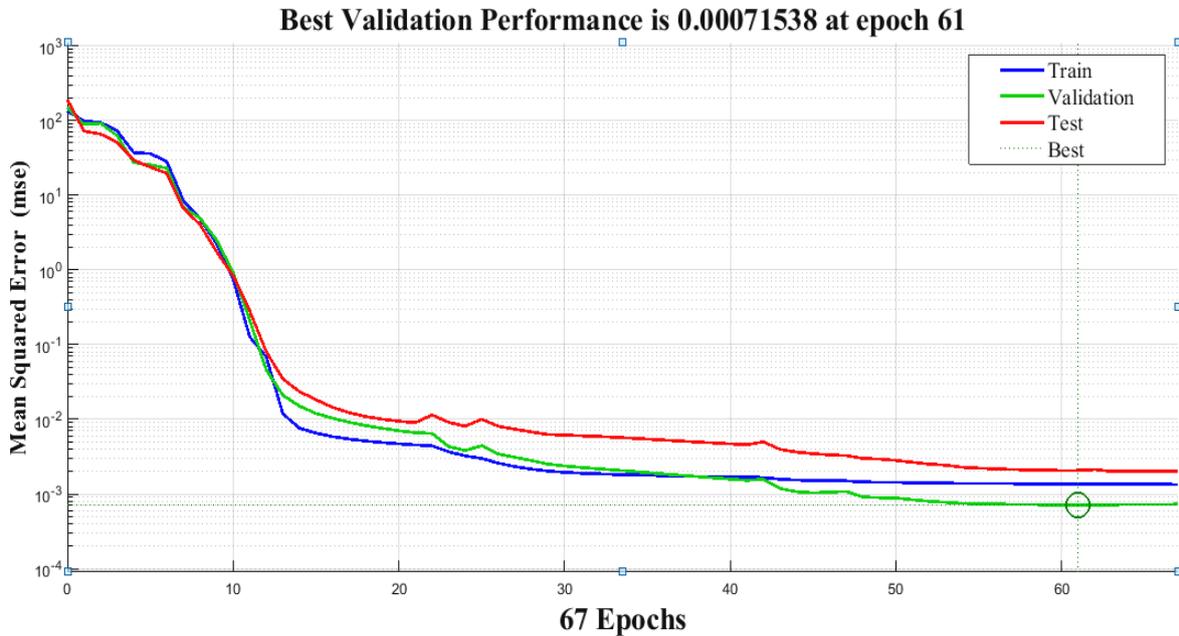
Les générateurs d'harmoniques contiennent toutes les possibilités existantes dans la référence [8]. L'algorithme proposé a été vérifié en simulant plus de 400 signaux et les résultats sont analysés à l'aide de MATLAB Mathworks.

La figure 4-1 montre l'organigramme de la logique utilisée pour la classification. La première étape consiste à calculer l'énergie d'un signal d'entrée au niveau sept ( $E_{d7}$ ) et comparer cette valeur avec l'énergie au niveau sept ( $E_{dp7}$ ) d'un signal pure (non perturbé). Si le signal est perturbé. Afin de classifier le générateur d'harmoniques par le réseau de neurone.



**Figure 4-2** Forme d'onde de quelques générateurs d'harmonique selon la référence [8]

La figure 4-2 illustre les formes d'onde de différents générateurs d'harmoniques. D'après cette figure on peut remarquer que chaque générateur possède une forme spéciale, et cela donne une propriété importante pour la transformée en ondelettes qui permettent d'identifier les différents caractéristiques de chaque type de générateur.



**Figure 4-3** Performance du réseau de neurone

**Tableau 4-1** Pourcentage de classification de quelques générateurs d'harmonique

	Nombre de signal	Classification
Signal pure	10	99 %
Variateur de vitesse	10	99 %
Redresseur / Chargeur	10	99 %
Redresseur / Chargeur +	15	98.5 %
Eclairage Fluorescent		
Charge informatique +	15	98.4 %
Variateur de vitesse		
Toutes les charges non linéaires	10	98 %

La figure 4-3 et le tableau 4-1 montrent la performance de classification de réseau neurone avec une Erreur quadratique moyenne de mse  $7.1 \times 10^{-3}$ .

Avec divers tests, on peut noter que l'algorithme proposé donne une meilleure performance avec une précision de 98% de classification.

#### 4.5. Dépollution des Harmoniques

Les systèmes d'électronique de puissance utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation. Ils travaillent en combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier. Parmi les solutions pour la dépollution des harmoniques consistent à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, la seconde est basée sur un filtrage des composantes harmoniques, Aussi des solutions traditionnelles et les solutions modernes.

##### 4.5.1. Solutions traditionnelles

- Compensation de la puissance réactive ;
- Placement d'une inductance de ligne ;
- Augmentation de la puissance de court-circuit ;
- Action sur la structure de l'installation ;
- Rééquilibrage des courants du réseau électrique ;
- Filtres passifs ;

##### 4.5.2. Solutions modernes

• **Filtres actifs** : Le principe du filtrage actif est de compenser les harmoniques présents sur les réseaux électriques en injectant des harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase. Dans la littérature il existe une grande variété de types de filtres actifs. Ils sont classés de différentes manières selon le nombre de phases (monophasés ou triphasés), la technologie de l'onduleur (avec ou sans neutre raccordé), et la topologie (l'onduleur de tension ou de courant).

**Filtre actif parallèle** : Les filtres actifs parallèles sont les plus utilisés et les plus traités dans les travaux de recherches. Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle.

**Filtre actif série :** Le filtre actif série est connecté en série avec l'alimentation par l'intermédiaire d'un transformateur d'adaptation, de sorte qu'il est applicable à la compensation des harmoniques d'un redresseur à diodes de grande capacité avec un condensateur de liaison à courant continu

**Filtre actif universelle :** elle est appelée UPQC (Unified Power Quality Conditioner), elle résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série

#### 4.6. Filtrage des harmoniques

Un récepteur d'énergie est considéré par les distributeurs de l'électricité comme une charge perturbatrice s'il [1]:

- absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés ;
- consomme de la puissance réactive ;

Différentes grandeurs sont définies afin de chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci et les plus utilisées sont le taux de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance (FP), caractérisant respectivement la pollution harmonique et la consommation de puissance réactive. Au delà, il est nécessaire de trouver des solutions ou des processus efficaces pour la détection et la minimisation de ce type de perturbation ou d'installer des dispositifs de filtrage sinon il faudra augmenter la puissance de court-circuit du réseau [129]. Le type de filtrage dépend d'une part des caractéristiques des harmoniques à filtrer et d'autre part de la performance exigée. Il est généralement plus facile et moins coûteux de filtrer des fréquences harmoniques de rang élevé que celles de rang bas. Ci-dessous sont listées différentes techniques de filtrage du bruit abordées par l'article [130]. Appellations a été pas traduites car étant plus explicites en anglais:

- Fast Fourier Transform-Based Denoising;
- Low Pass Filtering;
- Wigner-Ville Distribution-Based Denoising;
- Short-Time Foutier Transform-Based Denoising;

- Least Mean Square Approach;
- Frequency-Domain Adaptative Filtering;
- Recursive Least Squares and Exponentially Weighted Recursive Least Squares Methods;
- Matched Filtering;
- Notch Filtering;
- Wavelet Denoising;

Dans la suite, on va essayer de faire une étude comparative entre trois types de filtrage. Les méthodes de filtrage ont été évaluées en s'appliquant à des données simulées par le model illustré dans la figure 4-4. Ces trois programmes ont été conçus à l'aide de l'outil MATLAB.

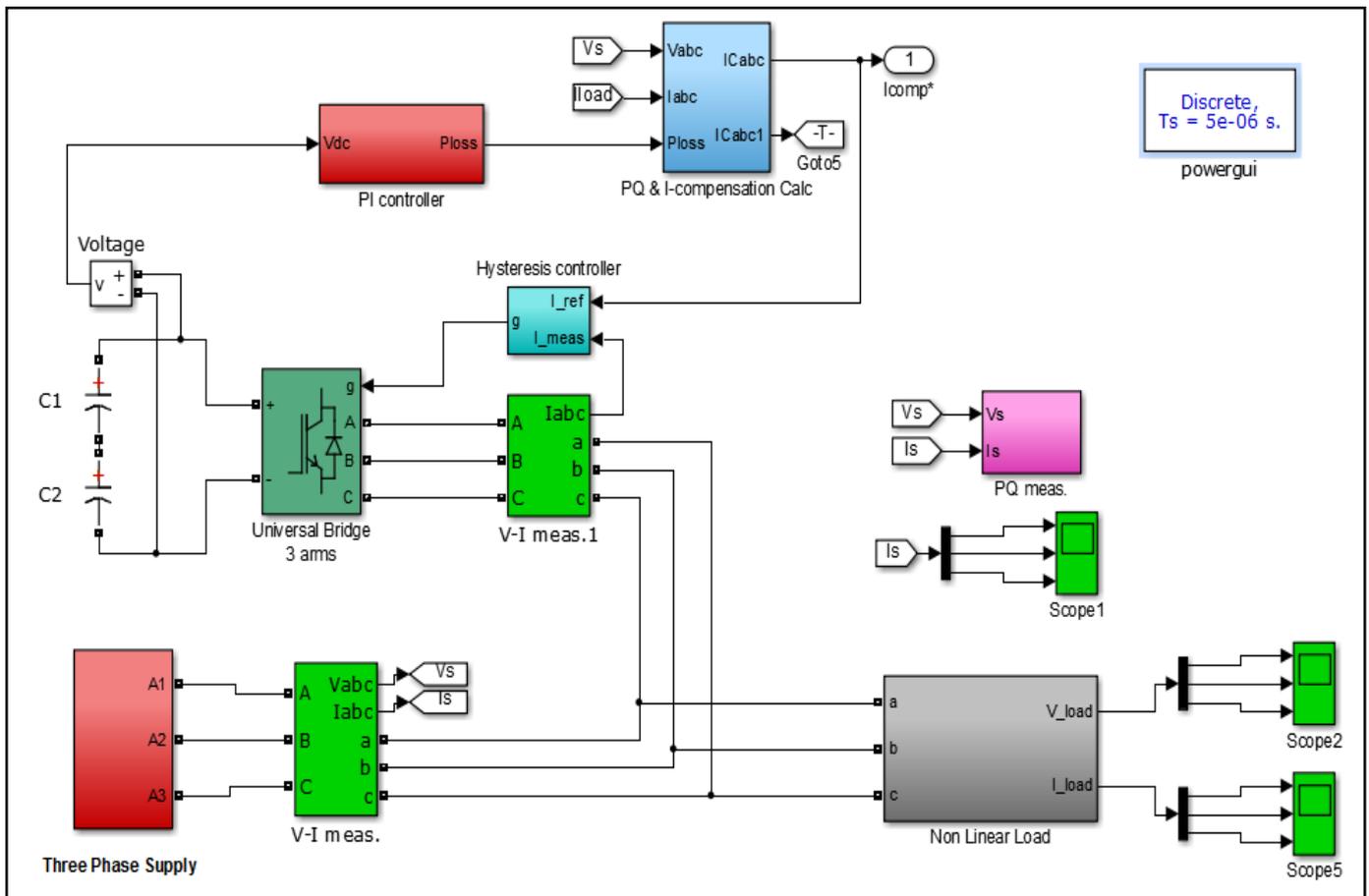


Figure 4-4 Modèle de simulation

Le circuit illustre le modèle de simulation, dans MATLAB/ SIMULINK.

Source triphasée:  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $V_{ph\_ph} = 380 \text{ V}$ ,

$R_s = 0.001 \text{ Ohms}$ ,  $L_s = 0.001 \text{ H}$ .

ligne:  $R_l = 0.01$  Ohms,  $L_l = 1e^{-6}$  H.

La charge:

Une charge non linéaire (diod):  $R_d = 1$  Ohms

Une charge linéaire:  $r = 11$  Ohms.

Cette charge est utilisée pour créer les harmoniques qui se propagent dans le réseau pour perturber la forme d'onde de courant et de tension (figures 4-5 et 4-6).

#### ➤ **Le filtre actif parallèle :**

Injecte des courants harmoniques au réseau, où la différence entre les courants à corriger et les courants injectés soit exempte des harmoniques que l'on veut éliminer. Théoriquement, le filtre actif parallèle peut être considéré comme un générateur de courant dont la forme d'onde du courant généré est contrôlée. Suivant la commande utilisée.

La structure générale d'un filtre actif parallèle est présentée sous forme de deux parties (blocs) [129]:

La partie de puissance et la partie de contrôle ou de commande.

- La partie puissance est constituée de :
  - Un onduleur à base de semi-conducteurs de puissance, commandés à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, MOSFET) avec des diodes en antiparallèle ;
  - Un circuit de stockage d'énergie ;
  - Un filtre de sortie ;
- La partie contrôle -commande est constituée de :
  - La méthode d'identification des courants harmonique ;
  - La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie ;
  - La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension ;
  - La commande de l'onduleur de tension ;

#### ➤ **Filtrage par ondelettes**

La transformation en ondelettes est aussi interprétée comme étant un processus de filtrage de signal analysé. La transformation en ondelettes peut aussi être considérée comme un processus de

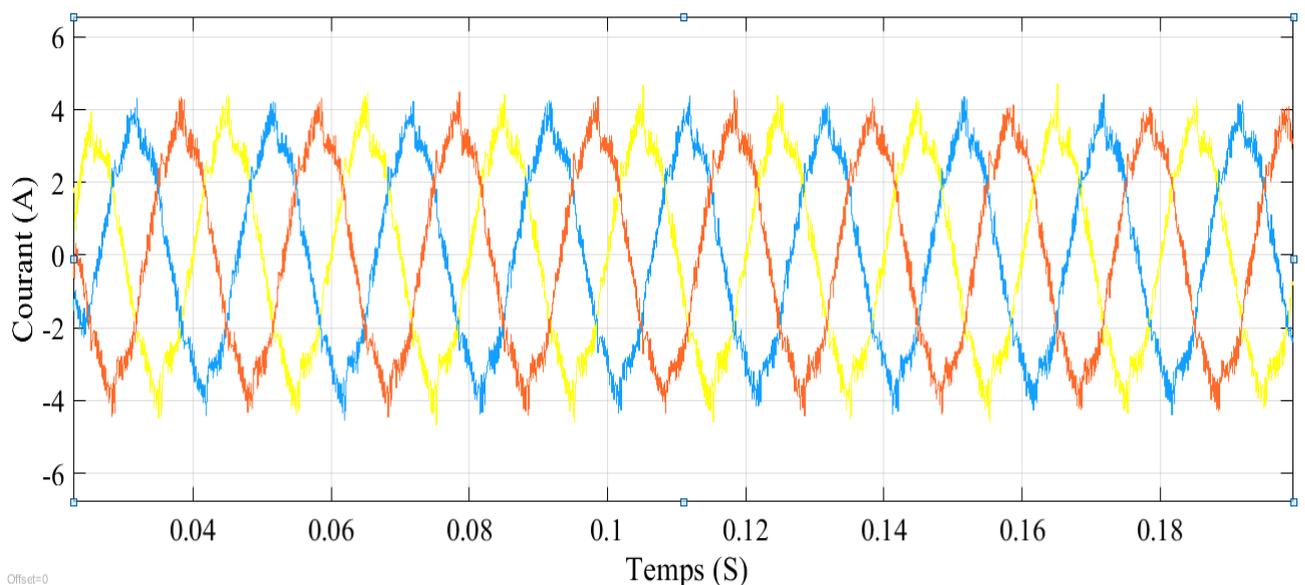
décomposition du signal en approximations et en détails. Le signal d'origine  $s(t)$ , traverse deux filtres complémentaires, passe-haut et passe-bas, et émerge en tant que deux signaux: respectivement le signal d'approximations A et le signal de détails D.

La procédure commence par le passage du signal à travers un filtre passe-haut et un filtre passe-bas (figure 2-3) auxquels sont associés les informations d'approximation et de détail. La sélection d'une ondelette appropriée est une tâche très importante dans cette étape. L'ondelette choisie doit être similaire au signal qui doit être filtré pour donner les meilleurs résultats possibles. Nous avons préféré la famille des ondelettes "Daubechies" en raison de leur précisions dans ce type des harmoniques. Après le processus de décomposition par l'ondelette discrète (MRA) on obtient deux vecteurs, l'un des vecteurs a des coefficients lisses (approximatifs) et l'autre a des coefficients troublant (détail). L'étape suivante consiste à éliminer les coefficients d'ondelettes de certains niveaux de l'analyse multirésolution. Après avoir appliqué la transformée en ondelettes et éliminé les coefficients perturbés, la transformée en ondelettes inverse a été appliquée dans la bande de fréquence la plus basse de l'DWT pour reconstruire la composante fondamentale en utilisant le même filtre passe-haut et passe-bas.

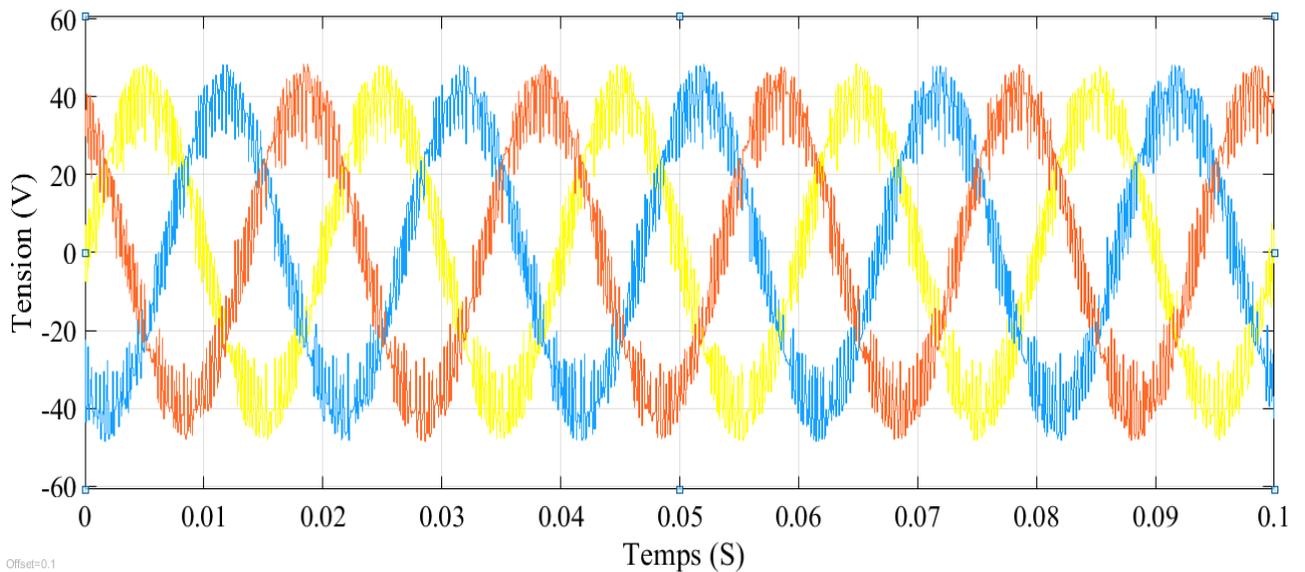
#### ➤ DFT filtre

Ce type de filtrage est basé sur la transformation de Fourier discrète plus de détail sur ce type dans les références [130] [131].

### 4.7. Résultats de simulation

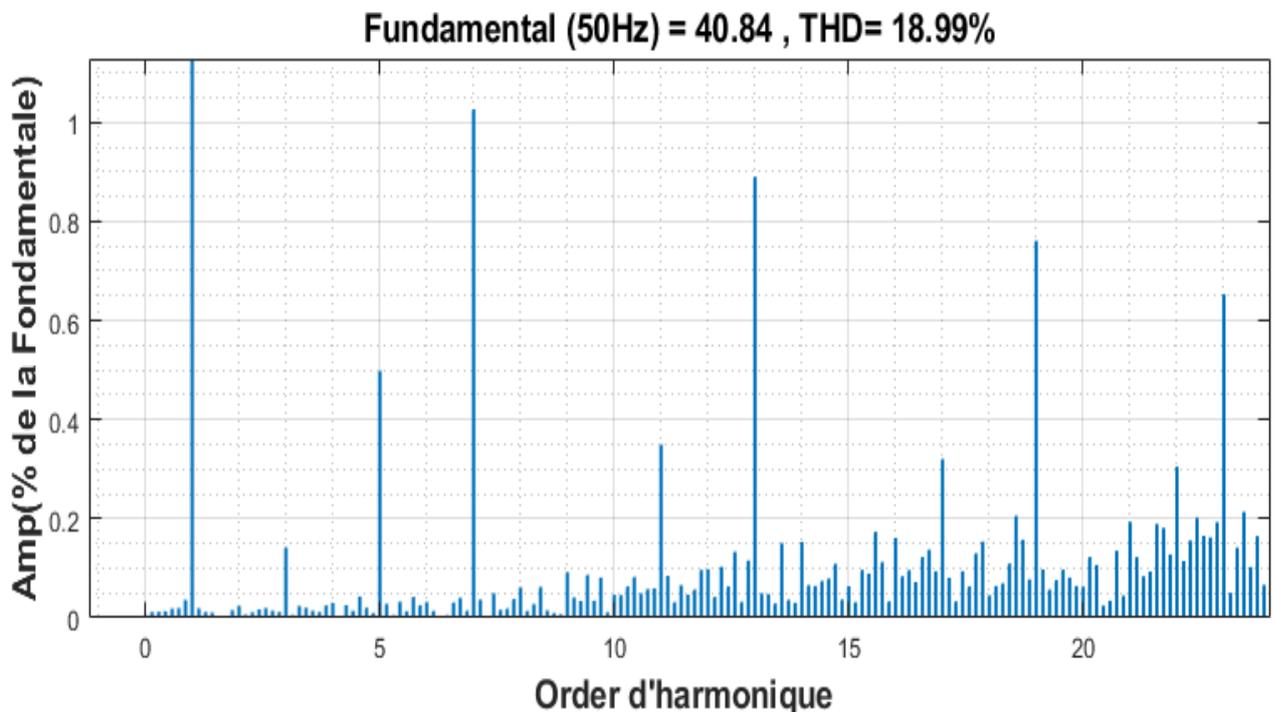


**Figure 4-5** Les courants de charge avant filtrage



**Figure 4-6** Les tensions de charge avant filtrage

Les Figures 4-5 et 4-6 montrent respectivement les formes d'ondes du courant et de la tension de la charge avant filtrage. On remarque que la charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui provoquent la pollution du réseau étudié. En effet, on constate des déformations dans l'onde du courant de source aussi qui perd sa forme sinusoïdale.



**Figure 4-7** Le spectre d'harmonique avant filtrage

L'analyse spectrale du courant absorbé par la charge est représentée dans la figure 4-7, cette dernière montre la présence, en plus de la fondamentale (rang 1), des harmoniques de rang 3, 5, 7,

11, 13, 17 et 19 ...etc.

Le taux de distorsion (THD) dans les phases (*a*, *b* et *c*) est de **18.99%**, ces valeurs sont bien au-dessus de la norme [132].

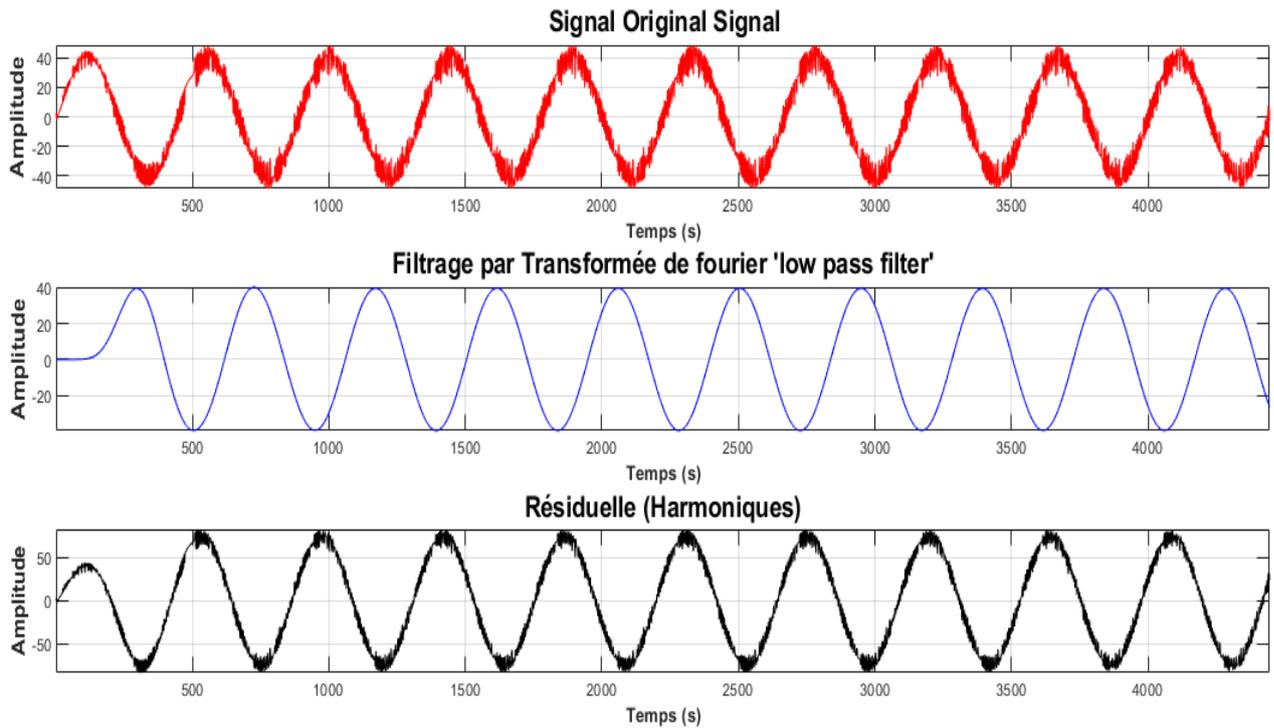


Figure 4-8 Filtrage par DFT de la phase A

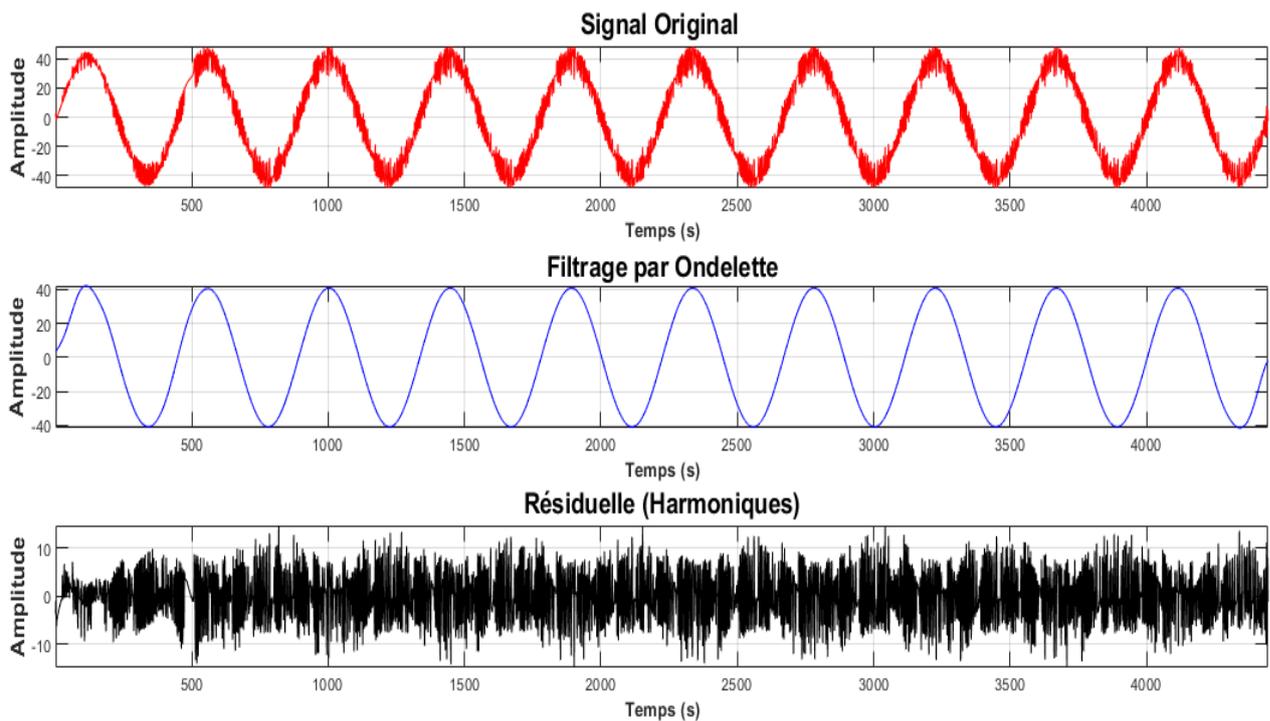
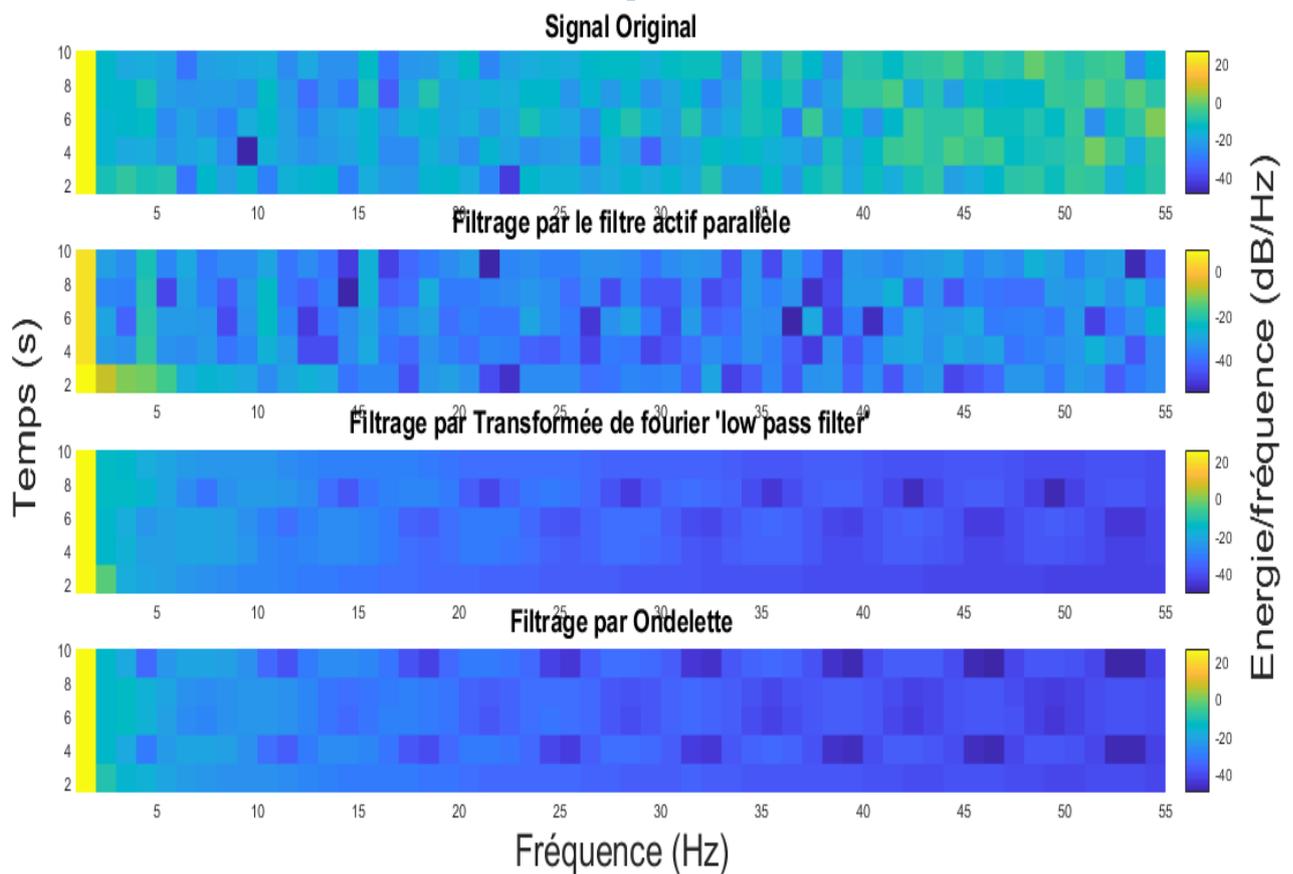


Figure 4-9 Filtrage par Ondelette de la phase A

Les figures 4-8 et 4-9 présentent la forme d'onde de la tension de charge effectuée sur une seule phase après le filtrage. Où la première figure montre le signal distorsionné et le signal filtré par la méthode DFT et la deuxième représente les résultats de filtrage par ondelette. Cette représentation confirme le non présence des harmoniques, ces dernières sont éliminées d'une façon remarquable et efficace.



**Figure 4-10** L'analyse spectrale (énergie fréquentielle) de la tension de charge

La figure 4-10 montre l'analyse spectrale (énergie fréquentielle) sur la même phase avant et après filtrage par les trois méthodes. Cette représentation spectrale confirme la minimisation des harmoniques par le filtre actif parallèle. Par conséquent, on peut dire que ces harmoniques ont bien éliminées par les deux autres méthodes.

Le tableau 4-2 représente les valeurs de THD par les trois méthodes de filtrage. Le THD qui était à 18.99% pour les phases (*a*, *b* et *c*) est réduit après filtrage à un taux très faible, de 1.02% pour la méthode basée sur les ondelettes, 1.7% pour la méthode DFT et 4.63% pour le filtre actif parallèle.

**Tableau 4-2** Les résultats comparatifs du THD après filtrage

Signal	THD (%)
Signal distorsionné	<b>18.99</b>
Filtrage par Ondelette	<b>1.02</b>
Filtrage par filtre actif parallèle	<b>4.63</b>
Filtrage par DFT	<b>1.7</b>

Afin de mieux exploiter les résultats obtenus dans le filtrage par ondelettes, ce résultat a été vérifié à travers divers ondelettes mère simulés, comme il est représenté dans le tableau 4-3.

**Tableau 4-3** Les résultats comparatifs du THD par diverses ondelettes mères dans différents niveaux

Ondelette Mère	Niveau de décomposition				
	Niveau 4	Niveau 5	Niveau 6	Niveau 7	Niveau 8
<b>Daubechies 8</b>	<b>3.9 %</b>	<b>2.1 %</b>	<b>1.02 %</b>	<b>2 %</b>	<b>4.2 %</b>
<b>Daubechies 7</b>	<b>4 %</b>	<b>2.97 %</b>	<b>1.1 %</b>	<b>3.9 %</b>	<b>5 %</b>
<b>Symlet 6</b>	<b>5.55 %</b>	<b>3.23 %</b>	<b>1.05 %</b>	<b>4.22 %</b>	<b>4.7 %</b>
<b>Coiflet 4</b>	<b>3.5 %</b>	<b>2.11 %</b>	<b>0.97 %</b>	<b>3.2 %</b>	<b>4.31 %</b>

D'après les résultats qui figurent dans le tableau 4-3, on constate que les valeurs de THD sont différents dans les divers ondelettes mères et presque égaux dans le niveau de décomposition 6, et cette différence due a la variation dans le type d'ondelette mère et le niveau de décomposition qui définir la structure de l'analyse multirésolution par la DWT.

Comme très bien résumé dans les résultats de simulation, nous concluons donc que la méthode de filtrage par ondelettes est la plu efficace pour le filtrage et la minimisation des harmoniques. De plus, cette méthode peut être utilisée pour extraire les différentes informations d'un signal perturbé d'une manière efficace.

#### **4.8. Conclusion**

Comme nous avons pu le constater dans ce premier chapitre, la qualité de l'énergie électrique est affectée pas les différents type des perturbations comme les creux de tension, le déséquilibre ainsi que les harmonique, qui engendrent la dégradation de la qualité de l'énergie et donc une mauvaise satisfaction et prestation du client.

Dans ce chapitre, nous avons en particulier présenté une méthode de classification des différents générateurs d'harmoniques basés sur les réseaux de neurone. Ensuite, nous avons présenté une étude comparative entre trois méthodes de filtrage afin d'évaluée le comportement des ondelettes et les harmoniques.

Les résultats de simulation ont confirmé de nouveau le degré de précision par la transformée en ondelette pour la détection des harmoniques et mettent en relief leur efficacité à la fois pour la minimisation harmonique. Les comportements des différentes méthodes sont proches et les formes d'ondes obtenues sont pratiquement identiques Avec fonctionnalité en faveur pour les ondelettes. Après filtrage, le pourcentage de THD ne dépasse pas 4% pour les différentes méthodes et les formes d'onde obtenues par les différentes méthodes sont semblables, aussi les résultats présentés au tableau 3.1 sont très proches pour les deux dernier méthodes (ondelettes et DFT). Par ailleurs, il est important de mentionner que les résultats étudiés dans le cadre de cette application ne contiennent qu'une seule source d'harmonique.

## Chapitre 05

# LES ONDELETTES ET LA PRÉVISION DE CHARGE

---

### 5.1. Introduction

La charge électrique est un facteur d'entrée majeur dans le développement économique d'un pays. Par la variation temporelle de la demande d'énergie et l'augmentation des énergies renouvelables, la charge électrique est devenue très variable. Par conséquent, la prévision précise de l'énergie demandée est un sujet très important et difficile au même temps [133]. D'autre part, les caractéristiques mêmes de cette énergie rendent nécessaires la prévision des consommations. L'énergie électrique ne peut être stockée de manière industrielle : elle n'apparaît qu'à l'instant où commence à fonctionner le générateur qui la crée, elle disparaît dès que cesse la marche de ce générateur. Toute demande supplémentaire d'énergie doit être satisfaite par la production d'un générateur en marche ou la mise en service instantanée d'un générateur supplémentaire.

Les installations de production, transport et distribution doivent être adaptées en tout instant et en tout lieu au développement de la demande. Un sous-équipement se traduira par des pertes pour l'économie dont la capacité de production ne sera pas utilisée à plein, faute d'énergie. De même, un suréquipement assurera la satisfaction de la demande mais, en revanche, aura immobilisé des capitaux excédentaires qui eussent mieux été employés par ailleurs. Dans tous les cas il y a gaspillage qui peut être évité par une évaluation correcte des besoins futurs en énergie. Cette prévision de la demande doit se faire à la fois dans le temps et dans l'espace. Dans le temps, l'adaptation de la production à la consommation doit être quasi instantanée et le diagramme de charge prend déjà un intérêt à l'échelle de la minute.

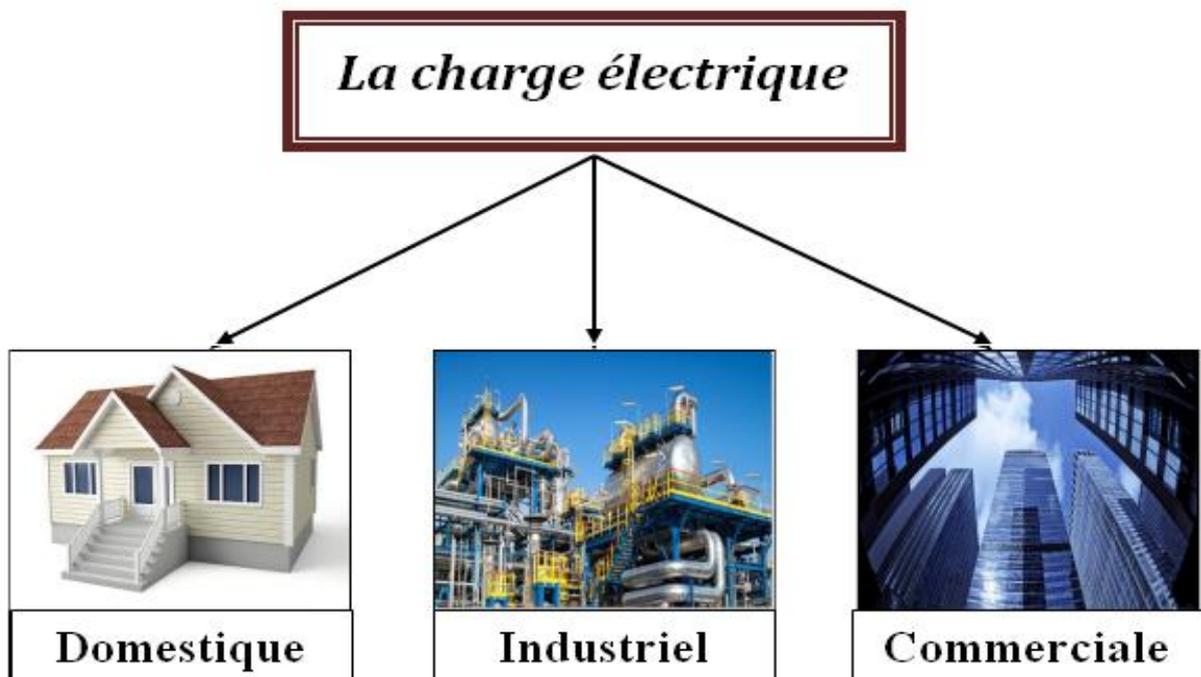
Ce chapitre décrit l'analyse de la prévision de la charge électrique sur des données horaires de la région NEPOOL (l'ISO New England) de l'année 2004 jusqu'à 2008. Nous allons présenter l'une des contributions de notre thèse, qui est une étape importante pour la construction d'un modèle prévisionnel.

Ce modèle permet également de visualiser la prévision, et manager tous les aspects relatifs à

son exercice. Ainsi que l'obtention de résultats satisfaisants avec un ensemble de données qui est petit et inadéquat pour une prévision de charge globale

## 5.2. La prévision de charge

La prévision de charge est une technique utilisée par les entreprises de production de l'électricité ou de l'énergie pour la prévision de l'énergie électrique nécessaire afin de répondre à l'équilibre de la production et la demande. Pour cela, la précision de la prévision de charge est une valeur importante pour le chargement opérationnel et la gestion d'une entreprise de service publics [134]. La prévision de charge constitue la base d'un fonctionnement des systèmes réseaux électriques modernes. De cette façon plusieurs modèles ont été proposés pour des prédictions à différents moments. Les fonctions d'exploitation de base telles que le problème d'attribution des unités dans la production d'électricité (unit commitment), dispatching économique, la planification du carburant et la maintenance des unités de production peuvent être exécutées efficacement avec une prévision précise [135]. La charge électrique à un moment donné est généralement supposée comme une combinaison linéaire de différents composants (Figure 5.1).



**Figure 5-1** Les secteurs concernés par la prévision de charge

Dans notre cas et du point de vue de l'analyse du signal, la charge peut être également considérée comme une combinaison linéaire de différentes fréquences et chaque composante de charge peut être représentée par ou une plusieurs fréquences [136].

Dans la littérature nous constatons qu'il existe plusieurs méthodes de prédiction pour différents horizons de prédiction et ces différentes méthodes ont des forces et des faiblesses très diverses et changent selon les contextes ou l'environnement de la prédiction.

La stabilité des réseaux électriques est strictement liée à l'équilibre entre la production et la consommation de l'énergie électrique. Pour cela, il est essentiel de connaître la consommation des charges ainsi que la production des sources d'énergie qui alimentent le réseau pour les gestions des réseaux électriques. Et pour contrôler cette stabilité on constate quatre type d'horizon de prédiction, ces horizons se présentent comme suit [137]:

➤ **Prévision à long terme**

La prévision de charge à long terme (Long Term Load Forecasting (LTLF)) permet de prédire la disponibilité ou l'indisponibilité de l'énergie pour des périodes allant d'un mois à des années. Ce type d'horizon permet également de faire la gestion du stockage d'énergie.

➤ **Prévision à moyen terme**

La prédiction à moyen terme (Medium Term Load Forecasting (MTLF)) peut être un outil pour un gestionnaire de réseau, permet de faire la gestion journalière d'un réseau dans des pics de demande journalière. Lorsqu'elle est combinée à la prédiction à court terme ce type de prévision permet d'anticiper à la production d'énergie journalière.

➤ **Prévision à court terme**

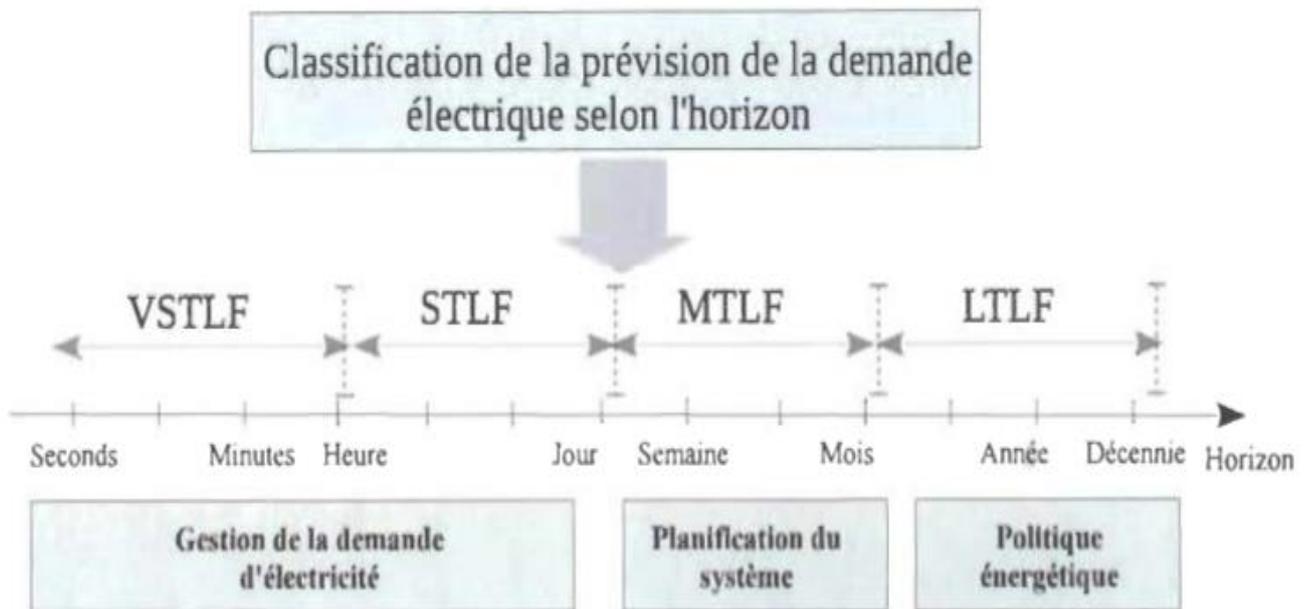
La prévision à court terme (Short Term Load Forecasting (STLF)) Ce type de prédiction est souvent utilisé pour la gestion d'un réseau dans un temps assez court pour des décisions en temps-réel pour la gestion des réseaux électrique.

➤ **Prévision à très court terme**

La prévision de charge à très court terme (Very Short Term Load Forecasting (VSTLF)) est utilisée pour la gestion d'un réseau pour des périodes de quelques secondes à 30 minutes. Elle est permet d'intervenir a des fluctuations dans un intervalle dans un temps très court dans les réseaux qui intègre des sources à énergies renouvelables.

La Figure 5-2 montre les quatre classes de prévision de la demande électrique. Il est à noter que toutes les catégories d'horizons nécessitent essentiellement l'historique de la demande électrique, les

informations météorologiques (selon la disponibilité des informations), mais aussi les données économiques et démographiques pour le cas des prévisions à long terme



**Figure 5-2** Les différentes horizons de la prévision de charge [138]

En plus de ces catégories de prévisions de la charge, une autre catégorie a émergé ces dernières années, le moyen-long terme, dans laquelle l'unité de temps considérée est le mois et l'année, elle se place naturellement entre le moyen et le long terme. Le moyen-long terme est très important pour la gestion et planification du réseau.

Par ailleurs, la littérature scientifique a proposé une famille d'approches statistiques facilitant l'exploration et l'analyse des données sans le besoin des caractéristiques physiques du bâtiment. Bien que ces modèles soient non-intrusifs, leur application se concentre sur les prévisions pour servir le gestionnaire du réseau en fournissant une valeur future de demande en électricité, plutôt qu'aider le client à comprendre sa consommation afin qu'il puisse décider et gérer sa propre demande.

### 5.3. Objectifs de la prévision de charge

L'objectif principal de la prévision de charge est de :

- **Pour les utilisateurs** : s'intéressent particulièrement à la diminution du coût de l'énergie consommée et à la satisfaction de critères de confort.

- de réduire les pics de consommation donc de réduire la puissance de l'abonnement ;

- de réduire la facture énergétique globale ;
- de réduire la consommation aux heures de pointe ;

• ***Pour le distributeur et fournisseur d'énergie :***

L'objectif d'un système de prévision de charge pour les fournisseurs est de garantir le niveau de production, tout en respectant les contraintes environnementales et les critères notions de service minimum. Récemment, dans un nouveau contexte de ressources décentralisées (cas énergies renouvelables) un système de gestion de ces charges doit être capable de faciliter l'intégration des nouvelles ressources au réseau. Aussi autres objectifs :

- de minimiser le coût énergétique ;
- de maximiser les services et les bénéfices ;

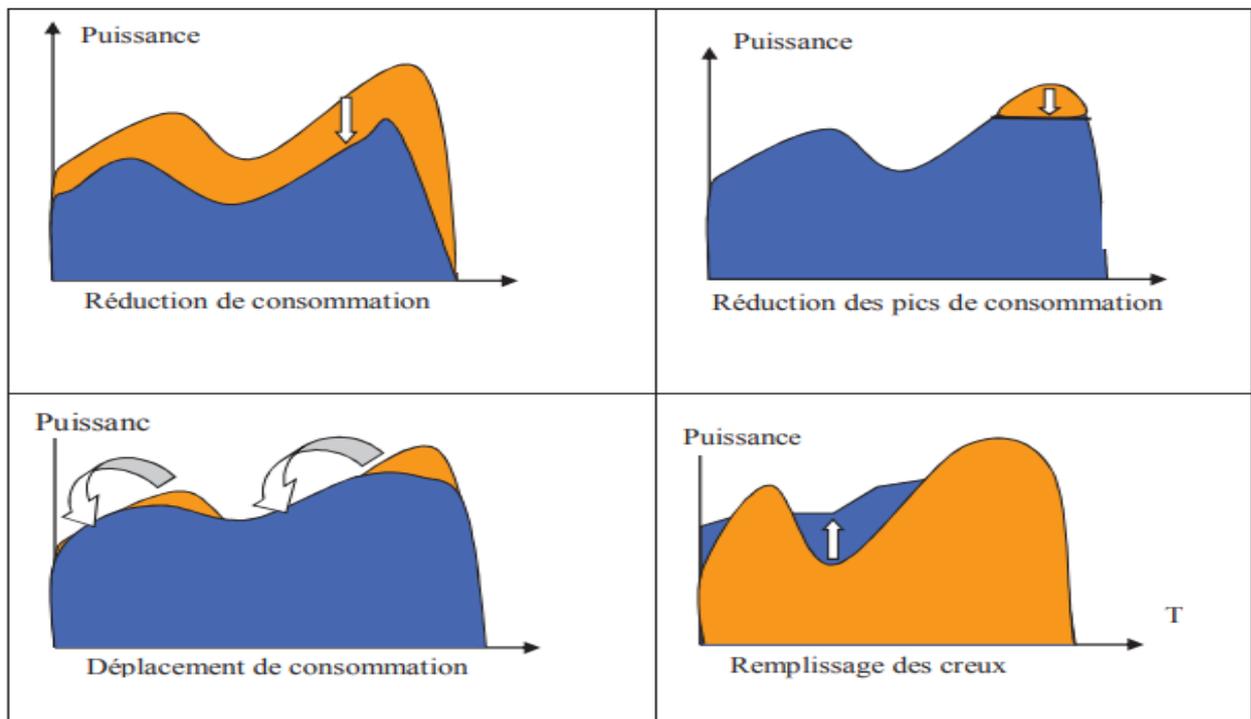
• ***Pour les gestionnaires du réseau :***

De contribuer efficacement aux services systèmes pour le gestionnaire du réseau, la réduction des pics de consommation pourra se révéler en cas d'urgence une solution très efficace et prometteuse pour :

- éviter les blackouts sur le réseau (l'énergie non distribuée lors d'un blackout coûte de plus en plus cher au gestionnaire du réseau) ;
- améliorer la stabilité du réseau (stabilité de tension et stabilité transitoire) ;
- contribuer au réglage de tension et de fréquence :

En général, les systèmes actuels de gestion de la charge sont réalisés en vue d'atteindre quatre objectifs [139]:

- Réduction de la consommation d'énergie ;
- Réduction des pics de consommation ;
- Réduction des factures de consommation : déplacer la consommation vers les périodes tarifaires les plus intéressantes ;
- Remplissage des creux de consommation ;



**Figure 5-3 :** Objectifs de la prévision de charge [139]

#### 5.4. Facteurs influencés sur la prévision de charge

La prévision de charge électrique dépend de différents facteurs :

- Le facteur historique
- Le calendrier :
  - Variation saisonnière ;
  - Variation quotidienne ;
  - Cycle hebdomadaire ;
  - Vacances ;
- Les conditions économiques ou environnementales
- Les conditions météorologiques :
  - Températures ;
  - Nébulosité, ensoleillement ;
  - Vitesse du vent ;
  - Humidité ;

- Précipitation ;

- Les événements aléatoires imprévus (grève, jours de football...etc).

### 5.5. Réseau de neurones et la prévision de charge

Les méthodes statistiques classiques de prévision de charge présentent l'avantage de leur simplicité. Elles peuvent, en outre, tenir compte de l'influence des différentes conditions météorologiques. Cependant, ces méthodes présentent quelques inconvénients :

- Il est difficile à tenir compte des non-linéarités entre les entrées et les sorties ainsi que des facteurs aléatoires ;
- Elles manquent de flexibilité pour les variations de charge rapides ;
- Les méthodes conventionnelles classiques comme la méthode de régression ou d'interpolation, peuvent ne pas fournir dans ce cas une précision suffisante. En plus, ces méthodes complexes avec des moyens de calcul très lourd peuvent converger lentement et peuvent même diverger dans certains cas. Elles ne sont donc pas bien adaptées à applications en temps réel ;

Un réseau de neurones artificiels (Neural Network) est une approche de calcul qui imite le fonctionnement des neurones biologiques. La conception et l'opération d'un réseau de neurones artificiels sont détaillées dans plusieurs articles, en particulier dans [140] [141]. Son modèle dit de perception est basé sur des méthodes d'apprentissage de type probabiliste.

Dans les systèmes de prévision des charges, certains problèmes sont extrêmement compliqués et non-linéaires. Il semble donc difficile de trouver un modèle mathématique qui les représente exactement. On pense alors aux méthodes d'apprentissage pour résoudre ces problèmes. Ainsi, différentes études sur les réseaux de neurones ont été développées pendant les dernières années afin de résoudre les problèmes non-linéaires. Les réseaux de neurones sont alors habituellement appliqués pour la prévision de la consommation d'énergie et pour la modélisation du fonctionnement des systèmes équipés des appareils à haut tension.

Il existe de nombreux modèles basés sur les réseaux de neurones et l'exemple ci-dessous présenté dans [141], utilise 6 paramètres de l'environnement en entrée (la température de l'air intérieur, la vitesse de l'air, la température de rayonnement, l'humidité relative, la quantité d'exercice, l'isolation des vêtements) pour estimer l'indice de confort thermique d'une pièce (l'indice PMV). Ce modèle de réseau de neurones a donc 6 neurones en d'entrée, 10 neurones dans la couche cachée et un neurone en sortie.

On rencontre de nombreux systèmes basés sur des modèles basés sur les réseaux de neurones notamment pour réaliser l'estimation de la consommation du chauffage [142], la modélisation des échanges de chaleur dans le système de climatisation [143] et pour prévoir la consommation électrique à court-terme du réseau électrique [144]. En conclusion, même si les réseaux de neurones peuvent avoir tendance à mémoriser le bruit affectant les données de formation, ils peuvent approcher de nombreux types de problème de relatives entrées-sorties. C'est généralement une méthode très flexible pour la prévision de consommation, la modélisation et le contrôle dans les systèmes de gestion des charges. Il a été démontré que les réseaux de neurones peuvent modéliser n'importe quelle fonction continue sur un domaine limité de variables [145].

**Tableau 5-1** Evaluation de la méthode basé sur les réseaux de neurone par rapport aux méthodes fondées dans la prévision de charge [146]

<b>Modèle</b>	<b>Complexité du modèle</b>	<b>Vitesse de calcul</b>
<b>Réseau de neurones</b>	<b>Assez élevée</b>	<b>élevée</b>
<b>Logique floue</b>	<b>élevée</b>	<b>Assez élevée</b>
<b>Algorithmes génétiques</b>	<b>élevée</b>	<b>faible</b>

La plupart des méthodes de contrôle intelligent sont très prometteuses grâce aux développements des technologies et de l'informatique qui permettent d'améliorer l'efficacité des systèmes de contrôle dans les bâtiments. On constate qu'il serait nécessaire de mettre en place un système de gestion de la charge électrique qui fusionne un ensemble de techniques, comprenant la gestion en temps réel, la gestion préventive et la gestion optimale.

La prévision, en particulier des charges résidentielles est très compliquée. Le choix de la méthode des réseaux de neurones peut être utilisé lorsque :

- Il n'existe pas de modèle mathématique précis de la charge ;
- La charge est une fonction des différents facteurs (passé, calendrier, météo, autres...etc.) ;
- La fonction de prévision est complexe et inconnue, et la relation non linéaire,

## 5.6. Modèle de neurone

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel, ou "perceptron", est illustré à la figure ci-dessous. Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées. Le résultat "n" de cette somme est ensuite transformé par une fonction de transfert f qui produit la sortie "a" du neurone.

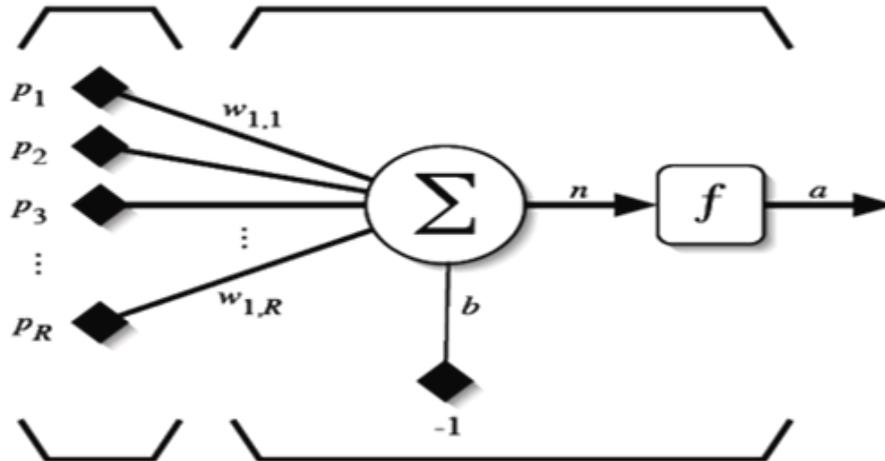


Figure 5-4 Le modèle mathématique d'un neurone artificiel

La sortie "n" de l'intégrateur est définie par l'équation suivante :

$$n = \sum_{j=1}^R w_{1,j} p_j - b = w_{1,1} p_1 + w_{1,2} p_2 + \dots + w_{1,R} p_R - b \quad (5-1)$$

Nous pouvons aussi écrire sous forme matricielle :

$$n = \overline{w}^T \vec{p} - b \quad (5-2)$$

La fonction d'activation f pour obtenir la sortie du neurone :

$$a = f(n) = f(\overline{w}^T \vec{p} - b) \quad (5-3)$$

Jusqu'à présent, nous n'avons pas spécifié la nature de la fonction d'activation et équation de notre modèle. Il se trouve que plusieurs possibilités existent et celles-ci sont quasiment empiriques et à adapter en fonction des situations. Les plus courantes et les plus citées dans la littérature sont énumérées dans la figure ci-dessous : Les trois les plus utilisées dans le domaine de l'ingénierie sont les fonctions "seuil" (a) (en anglais "hard limit"), "linéaire" (b) et "sigmoïde" (c) comme représentées ci-dessous :

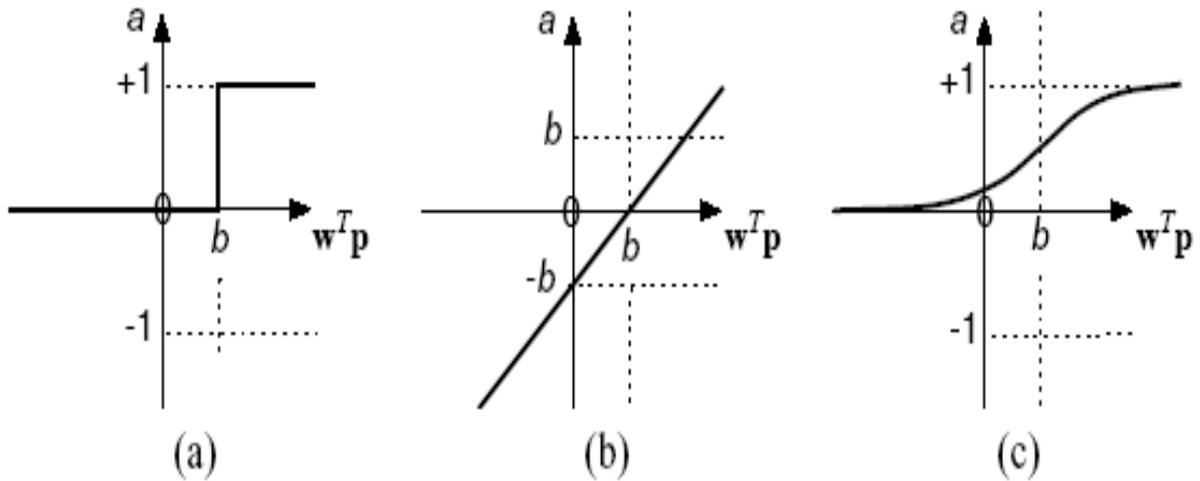


Figure 5-5 Fonction d'activation : "seuil" (a), "linéaire" (b) et "sigmoïde" (c)

La fonction de transfert sigmoïde est quant à définie par la relation mathématique :

$$a = \frac{1}{1+e^{-x}} \tag{5-4}$$

Finalement, pour construire un réseau de neurones (ou PMC pour "Perceptron Multi-Couches"), il ne suffit plus que de combiner des couches comme ci-dessous :

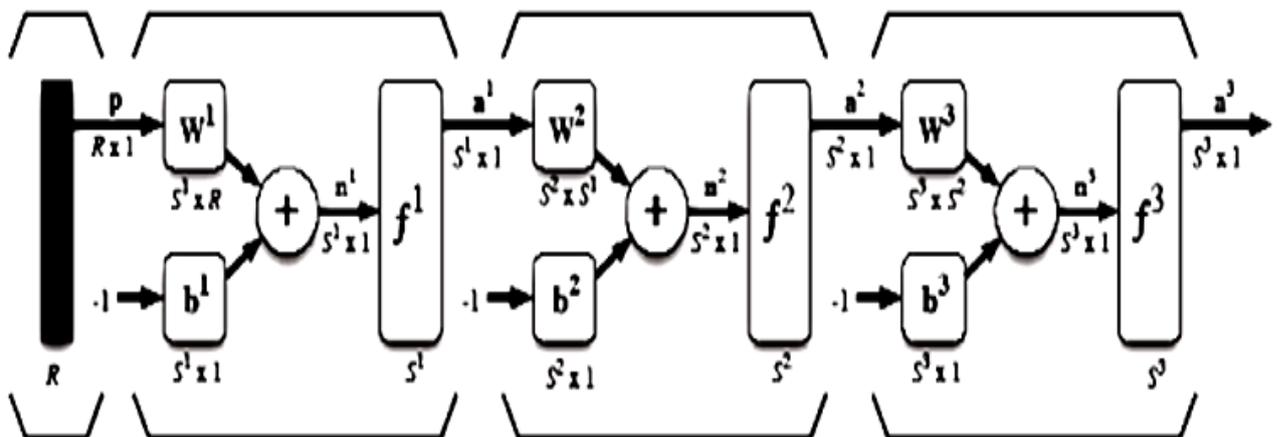


Figure 5-6 Le modèle mathématique d'un neurone artificiel de trois couches

Les réseaux multicouches sont beaucoup plus puissants que les réseaux simples à une seule couche bien évidemment. En utilisant deux couches, à condition d'employer une fonction d'activation sigmoïde sur la couche cachée, nous pouvons "entraîner" un réseau à produire une approximation de la plupart des fonctions, avec une précision arbitraire. Sauf dans de rares cas, les

réseaux de neurones formels exploitent deux ou trois couches.

L'erreur absolue moyenne en pourcentage (MAPE) par la technique proposée est définie comme suit :

$$\text{MAPE (\%)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_{ai} - P_{fi}}{P_{ai}} \right| * 100 \quad (5-5)$$

Où,  $P_{ai}$  est la charge réelle,  $P_{fi}$  est la prévision de charge,  $N$  est le nombre de points de données.

## 5.7. Modèle proposé

Des modèles dit hybrides ou multi-modèles ont vu le jour ces derniers temps, leur principe est de combiner des modèles issus de l'intelligence artificielle pour avoir de meilleurs résultats.

Chaque méthode computationnelle a ses avantages et inconvénients. Notamment, les réseaux de neurones artificiels, qui ont été utilisés dans la littérature pour la prévision de la charge électrique. Cependant, ils sont connus pour être gourmands en données d'apprentissage [146].

Cette partie montre un algorithme de prévision de charge d'électricité à court terme à l'aide du MATLAB. Deux modèles ont été proposés basés sur le réseau de neurone.

Cet exemple montre comment construire un système de prévision de la charge d'électricité à court terme avec MATLAB.

Les modèles sont formés sur des données horaires de la région NEPOOL (l'ISO New England) de l'année 2004 jusqu'à 2007, et les données de l'année 2008 comme des données de teste [147].

Le modèle de la prévision non linéaire crée une matrice d'entrées incluant :

Température (sèche Humide) ;

Heure du jour ;

Jour de la semaine ;

Indicateur vacances / week-end (0 ou 1) ;

Charge moyenne de 24 heures précédente ;

Charge retardée sur 24 heures ;

Charge décalée de 168 heures (semaine précédente) ;

### 5.8. Résultats de simulation

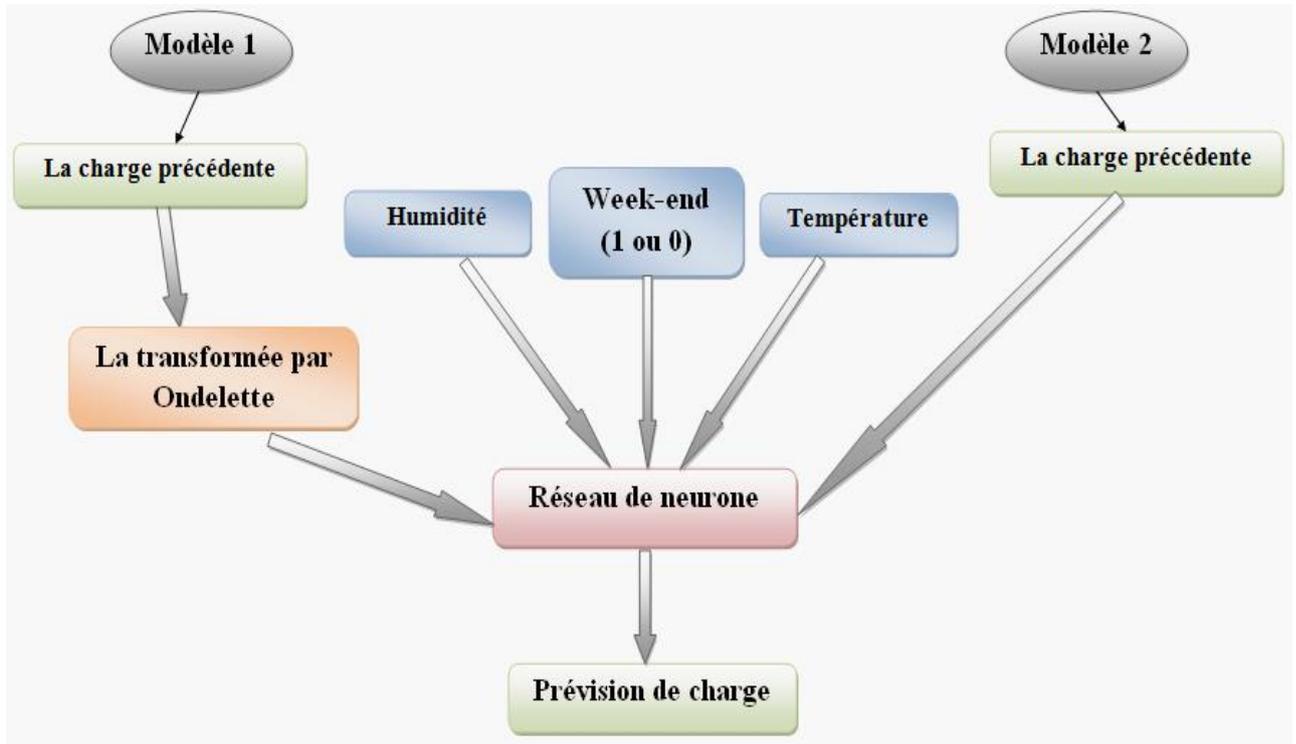


Figure 5-7 Organigramme pour la prévision de charge par les deux méthodes

Le processus de l'algorithme proposé décompose l'historique de la charge a une partie d'approximation associée aux basses fréquences et en plusieurs parties de détails associées aux hautes fréquences à travers la transformée en ondelette discrète (DWT). La figure 5.7 montre la structure des modèles proposés.

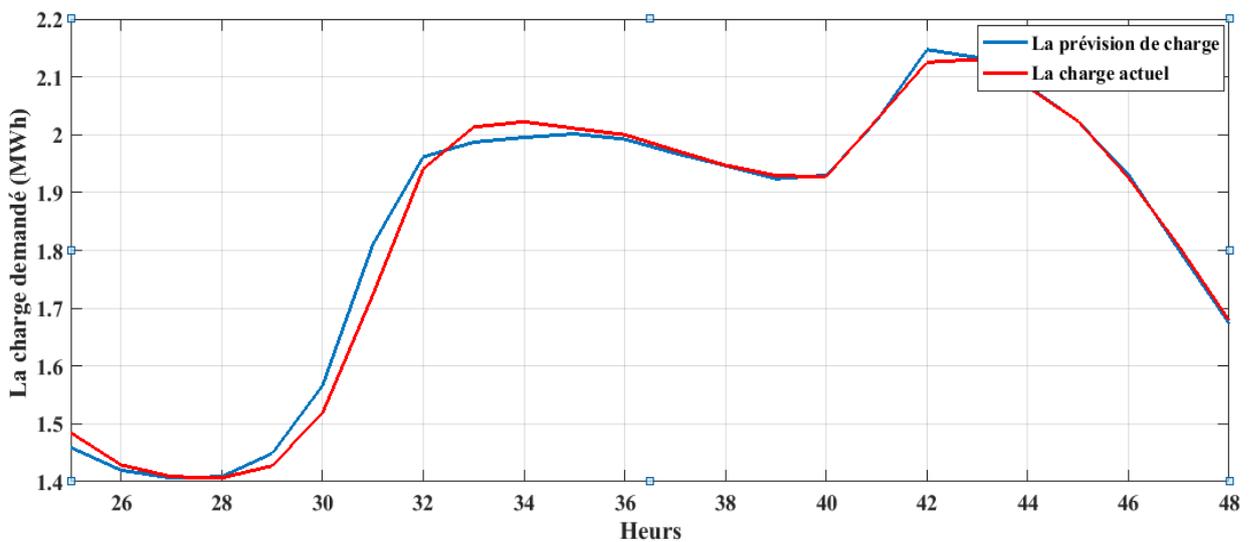
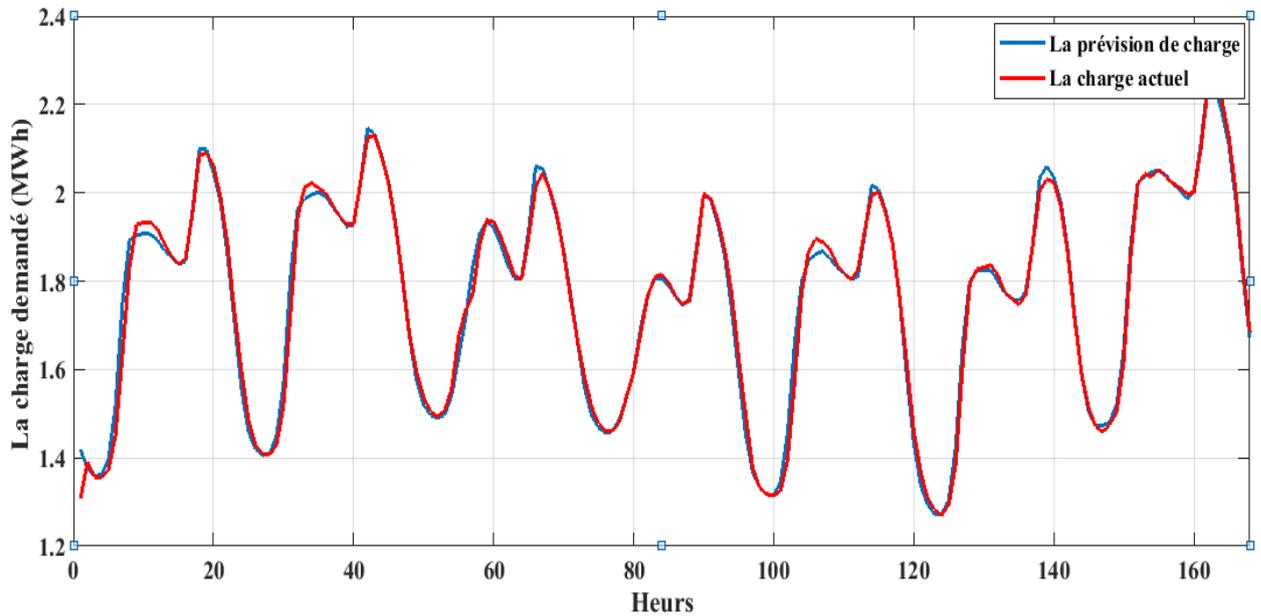


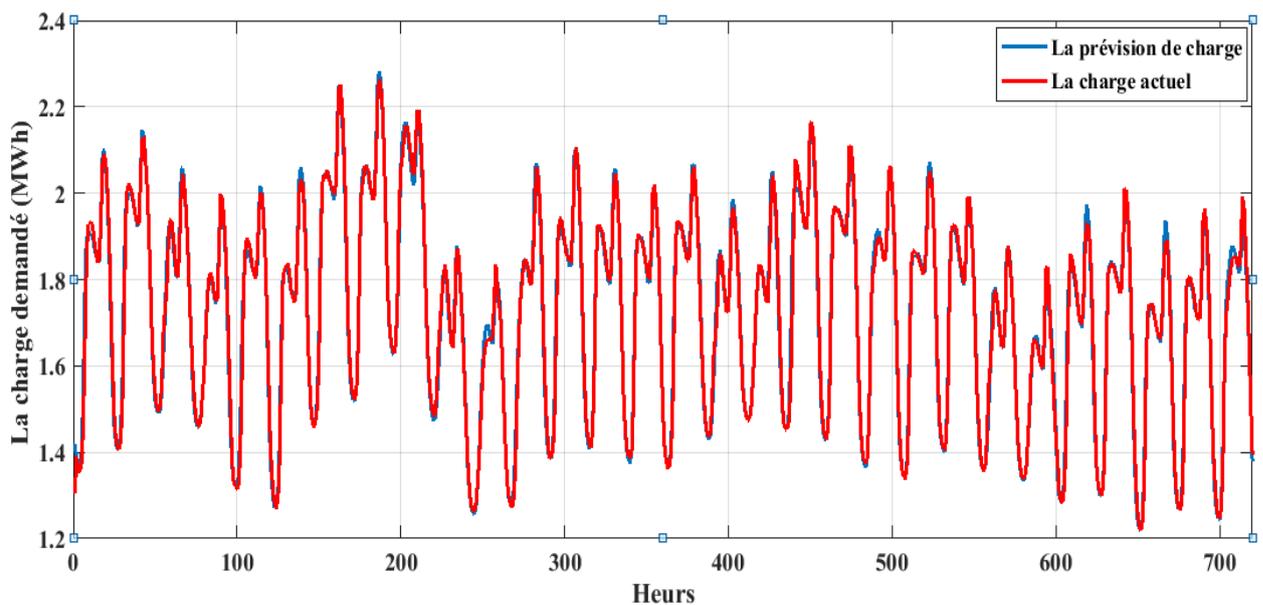
Figure 5-8 La prévision de charge pour une journée (24 heures) par la méthode des ondelettes

Les figures de 5-8 et 5.9 montrent les résultats de simulation d'une journée (24 heures) et d'une semaine (168 heures) respectivement de prévision par la méthode basé sur la transformée en ondelettes.

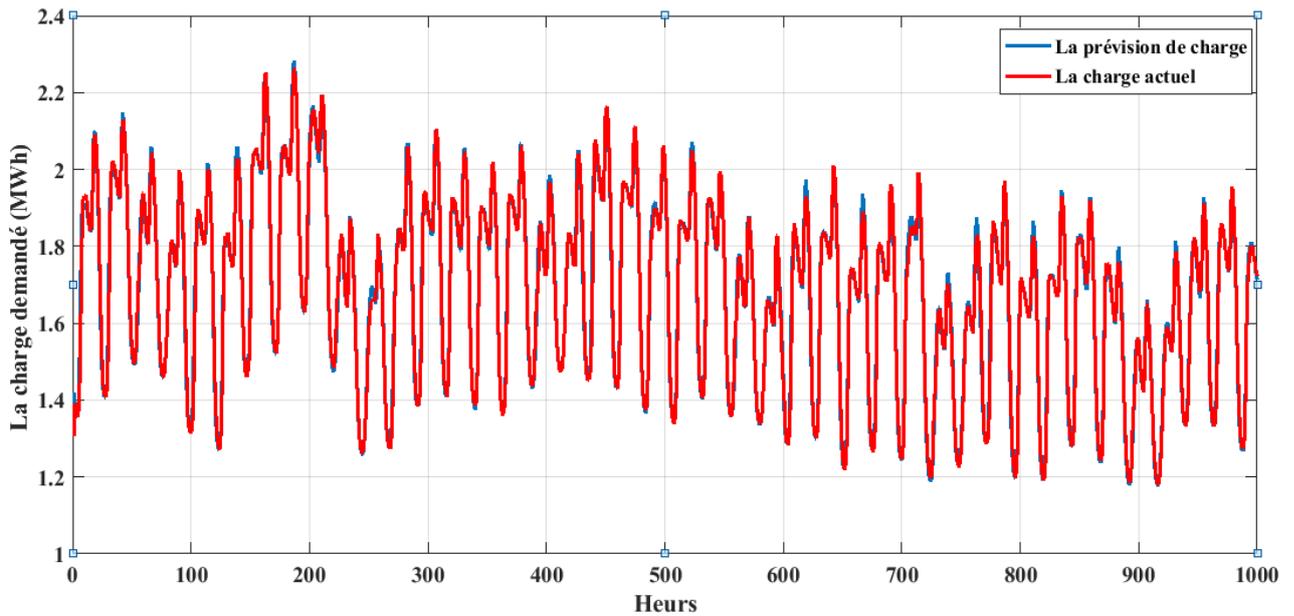


**Figure 5-9** La prévision de charge pour une semaine (168 heures) par la méthode des ondelettes

Pour une meilleure visualisation, la figure 5-10 montre les résultats du test pour 1 mois de prédiction. Par contre la figure 5-11 représente la prévision de charge durant 6 semaines. Les résultats numériques de tout les cas d'essai sont indiqués dans le tableau 5-2.



**Figure 5-10** La prévision de charge pour un mois par la méthode des ondelettes



**Figure 5-11** La prévision de charge pour 6 semaines par la méthode des ondelettes

Selon les résultats des erreurs MAE et le MAPE de la prédiction utilisant les deux méthodes (Tableau 5-2), on remarque dans ce cas que la méthode basée sur les ondelettes permet d'obtenir des résultats légèrement plus précis que la méthode de réseaux de neurone sans ondelettes avec une erreur absolue moyenne (MAE) de 214.26 MWh et un pourcentage d'erreur absolue moyenne (MAPE) de 1.41 %, par contre l'autre méthode atteint un pourcentage d'erreur absolue moyenne (MAPE) de 1.48 % et une erreur absolue moyenne de (MAE) 224.80 MWh.

**Tableau 5-2** Les valeurs de MAPE et MAE de la prévision par les deux méthodes

	Ondelettes-Réseaux de neurone (Modèle 1)	Réseaux de neurone (Modèle 2)
<b>Pourcentage d'erreur absolue moyenne (MAPE) Tous les données</b>	1.41 %	1.48 %
<b>Erreur absolue moyenne (MAE)</b>	214.26 MWh	224.80 MWh
<b>MAPE d'une journée</b>	1.49 %	1.52 %
<b>MAPE 1ère semaine</b>	1.51 %	1.91 %
<b>MAPE 2ème semaine</b>	1.28 %	1.33 %

Sur la base de la décomposition par ondelettes, les résultats utilisant différentes ondelettes mère sont comparés et sont partiellement rapportés dans le tableau 5-3. Les résultats présentés dans ce

tableau montrent que l'ondelette mère db4 donne la meilleure précision de prévision avec une erreur absolue moyenne (MAE) de 214.26 MWh. Par conséquent, le pourcentage d'erreur absolue moyenne (MAPE) est 1.41 %, est le pourcentage le plus petit par rapport aux autres ondelettes mère.

**Tableau 5-3** Comparaison des résultats de la prévision de charge de différentes ondelettes mères

	Ondelettes Mère			
	db2	db4	db6	db8
<b>Pourcentage d'erreur absolue moyenne (MAPE) Tous les données</b>	2 %	1.41 %	2.07 %	3.33 %
<b>Erreur absolue moyenne (MAE)</b>	319.55 MWh	214.26 MWh	256.2 MWh	325.17 MWh
<b>MAPE d'une journée</b>	2.4 %	1.49 %	1.97 %	2.26 %
<b>MAPE 1ère semaine</b>	2.35 %	1.51 %	2.22 %	3.65 %

De la même manière, les résultats qui ont été réalisés par la référence [148] et les valeurs des erreurs absolues moyennes (MAEs) indiquent que le db4 donne aussi une meilleure précision de prédiction.

Les résultats montrent que la transformée en ondelette a augmenté la précision de la prévision en utilisant l'ondelette mère db4, et elle donne aussi le meilleur MAPE, RMSE, MAE ce qui en fait le meilleur modèle de précision de prédiction par rapport à l'autre modèle.

## 5.9. Conclusion

Le développement économique, à travers le monde, dépend directement de la disponibilité de l'énergie électrique. La disponibilité d'une source d'énergie continue, pas chère et fiable est d'une importance économique avant tout. Ainsi, la prévision de la charge électrique est un outil important utilisé pour veiller à ce que l'énergie fournie par les services publics réponde à la demande en plus de l'énergie perdue dans le système.

La plupart des méthodes mettent en œuvre les techniques de séries temporelles pour prévoir la forme de la courbe de charge, mais ces techniques ne sont pas suffisamment exactes pour garantir l'approche de la prévision.

Dans ce chapitre, un modèle basé sur les réseaux de neurones artificiels et les ondelettes est proposé pour la prévision de la charge électrique sur des données horaires de la région NEPOOL

(l'ISO New England) de l'année 2004 jusqu'à 2008. Le modèle a été conçu dans l'objectif d'avoir de bonnes performances. La décomposition par les ondelettes augmente considérablement les performances du modèle, et la combinaison donne des résultats concluants.

Le modèle et l'architecture proposés ont été capables de prédire l'évolution de la courbe de charge horaire de la consommation électrique. Les résultats présentés montrent que l'ondelette mère db4 donne la meilleure précision de prévision avec une erreur absolue moyenne (MAE) de 214.26 MWh. Par conséquent, le pourcentage d'erreur absolue moyenne (MAPE) est de 1.41 %, est le pourcentage le plus petit par rapport aux autres ondelettes mère. Comme nous l'avons remarqué au cours de notre étude, il n'existe aucune procédure bien concrète pour définir l'architecture exacte du réseau et des autres paramètres qui permettent de définir le modèle (nombre de neurones cachés, taux d'apprentissage, etc.).

# CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

---

– Dans le cadre de la thèse, la qualité de l'énergie électrique est devenue un sujet important pour les compagnies d'électricité, le personnel d'exploitation, de maintenance ou de gestion des sites tertiaires ou industriels et les constructeurs d'équipements. Avec l'augmentation rapide des énergies renouvelables, cette qualité peut être facilement perturbée par la distorsion de ces sources dans les réseaux électriques et peut être soumis à de multiples perturbations et peuvent endommager les machines et fragiliser toutes les installations électriques, ce qui peut entraîner des coûts élevés.

– Par conséquent, pour améliorer et assurer la qualité de l'énergie électrique, les perturbations doivent être détectées et si possible la détection doivent être proche de la source de ces perturbations. Une des solutions les plus efficaces pour éviter ces perturbation est l'utilisation des méthodes robuste et efficace ayant pour but, de détecté et de classifié ces perturbation parmi lesquelles le traitement des signaux électriques.

– Notre contribution dans ce thème consiste au développement des méthodes basée sur la transformée en ondelettes. Comme problématique nous avons pris en étude quelques types de perturbations existants dans les réseaux électriques qui affectent la qualité d'énergie électrique. Les techniques de traitement des signaux doivent être nécessaires pour l'extraction les données des signaux de la décharge partielle et la transformation en ondelettes l'un de ces techniques.

– Les ondelettes ont d'abord été appliquées dans le système de réseaux électrique en 1994. Depuis cette année, le nombre de publications dans ce domaine a augmenté. L'analyse par ondelettes peut être utilisée dans l'analyse des réseaux de transport et dans la distribution de l'énergie électrique.

– Cependant, nous avons abordé en premier lieu les différentes techniques basées sur la transformée par ondelette dans les différents domaines des réseaux électrique. Par la suite nous avons étudié le comportement des ondelettes sur quelques types de perturbation qui affectent la qualité d'énergie. Cette approche nous a permis d'extraire les différentes informations liées à ces perturbations. Des simulations avec différentes proportions de ces différents types de perturbations ont été réalisées afin d'évaluer le comportement des ondelettes dans le domaine de la qualité de l'énergie.

– Enfin, la transformée en ondelette est combiné avec des méthodes d'intelligence artificiel, basées respectivement sur le réseau de neurone et les machines a vecteur de support (SVM).

Les résultats de simulations obtenus sur le logiciel Matlab, confirment l'efficacité de ces méthodes proposées. De plus, nous avons montré que cette dite « ECO-C-SVM » permet également d'améliorer les performances de classification du SVM. Cela est justifié par les précisions de classification obtenues. En outre, la stratégie de classification proposée est très simple et robuste.

La démarche suivie et les résultats présentés par les chercheurs et leurs études dans ce travail ouvrent de multiples perspectives sur l'étude des différentes applications de ces ondelettes dans les différents domaines des réseaux électriques, en tenant compte des données réelles. Afin d'améliorer et assurer la qualité de l'énergie électrique, et les perturbations doivent être détectées et si possible la détection est proche de la source de ces perturbations.

## **Annexe A** Les paramètres de réseau IEEE 9 Jeu de barres

Les tableaux suivants représentent les données et les paramètres des lignes, les générateurs et les charges de réseau IEEE 9 Jeu de barres

**Tableau A-1 Paramètres des lignes pour le réseau 9 Jeu de barres**

ligne	Résistance (p.u)	Réactance (p.u)	Susceptance (p.u)
<b>1-4</b>	0.0000	0.0576	0.0000
<b>4-5</b>	0.0170	0.0920	0.1580
<b>5-6</b>	0.0390	0.1700	0.3580
<b>3-6</b>	0.0000	0.0586	0.0000
<b>6-7</b>	0.0119	0.1008	0.2090
<b>7-8</b>	0.0085	0.0720	0.1490
<b>8-2</b>	0.0000	0.0625	0.0000
<b>8-9</b>	0.0320	0.1610	0.3060
<b>8-4</b>	0.0100	0.0850	0.1760

**Tableau A-2 Paramètres des générateurs pour le réseau 9 Jeu de barres**

Paramètres	Générateur 1	Générateur 2	Générateur 3
<b>H (sec)</b>	23.64	6.4	3.01
<b>X<sub>d</sub> (p.u)</b>	0.146	0.8958	1.3125
<b>X'<sub>d</sub> (p.u)</b>	0.0608	0.1198	0.1813
<b>X<sub>q</sub> (p.u)</b>	0.0969	0.8645	1.2578
<b>X'<sub>q</sub> (p.u)</b>	0.0969	0.1969	0.25
<b>T'<sub>d0</sub> (p.u)</b>	8.96	6.0	5.89
<b>T'<sub>q0</sub> (p.u)</b>	0.31	0.535	0.6

Tableau A-3 Données et les paramètres de réseau IEEE 9 Jeu de barres

Jeu de barre	Tension (Kv)	Tension (p.u)	Angle (deg.)	Charge (MW)	Charge (Mvar)	Générateur (MW)	Générateur (Mvar)
1	17.6	1.04	0			71.63	27.91
2	18.45	1.03	9.35			163	4.9
3	14.15	1.03	5.14			85	-11.45
4	235.8	1.03	-2.22				
5	229.9	1	-3.68	125	50		
6	232.8	1.01	-3.57	90	30		
7	236.2	1.03	3.8				
8	234	1.02	1.34	100	35		
9	237.5	1.03	2.44				

## Références Bibliographiques

- [1] V. Ignatova, S. BACHA, P.GRANJON, "Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique", Thèse de doctorat, Université Technique de Sofia, Bulgarie, Octobre 2006.
- [2] B. Doucouré, "Proposition, intégration dans un système de gestion de réseau intelligent et validation expérimentale d'une méthode de prédiction pour un système d'énergies renouvelables", Thèse de doctorat, Université du Québec, Québec, janvier 2016.
- [3] M. Caujolle, M.G. Fleury, M.M. Petit, "Identification et caractérisation des perturbations affectant les réseaux électriques HTA", Thèse de doctorat, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes, France, septembre 2011.
- [4] R. Shariatinasab, M. Akbari, R. Bijan, " Application of Wavelet Analysis in Power Systems ", chap 11 in " Advances in wavelet Theory and their applications in engineering, physics and technology application of wavelet analysis in power systems ", Edited by Dr. Dumitru Baleanu, 2012.
- [5] P.F Ribeiro, "Wavelet Transform: an Advanced Tool for Analyzing non-Stationary Harmonic Distortion in Power System", Proceedings of the IEEE International Conference on Harmonics in Power Systems, Bologna, Italy, September 21-24, 1994 H. Poor, An Introduction to Signal Detection and Estimation. New York: Springer-Verlag, ch. 4, 1985.
- [6] D. Robertson, O. Camps, J. Mayer, "Wavelets and Power System Transients: Feature Detection and Classification", Proceedings of SPIE international symposium on optical engineering in aerospace sensing, Vol.2242, Orlando, FL, USA, pp. 474-487, April 5-8, 1994.
- [7] J. Kaushal, P. Basak, "Power quality control based on voltage sag/swell, unbalancing, frequency, THD and power factor using artificial neural network in PV integrated AC microgrid", Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol 23, September 2020.
- [8] Ph. Ferracci, "Power Quality", Cahier technique no. 199.
- [9] P.K. Dash and A.M. Sharaf, "A Kalman filtering approach for estimation of power system harmonics", 3rd International Conference on Harmonics in Power Systems (ICHPS), Nashville, USA, pp. 34-40, 1988.
- [10] A.A. Girgis, W.B. Chang, E.B. Makram, "Analysis of high-impedance fault generated signals using a Kalman filtering approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 5, pp 1714- 1724, 1990.
- [11] M. Najjar and G.T. Heydt, "A hybrid nonlinear least square estimation of harmonic signal levels in power systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 6, pp 282-288, 1991.
- [12] E.A. Abu Al-Feilat, I. El-Amin, M. Bettayeb, "Power system harmonic estimation: A comparative study", Electric Power Systems Research. Vol 29, pp 91-97, 1994.
- [13] F.Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae, "A study of active power filters using quard-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 5, pp 9-15, 1990.
- [14] W.K. Chang, W.M. Grady, M.J. Samotyj, "Meeting IEEE-519 harmonic voltage and voltage distortion constraints with an active power line conditioner", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 9, pp 1531-1537, 1994.
- [15] Y.Y. Hong, Y.K. Chang, "Determination of locations and sizes for active power line conditioners to reduce harmonics in power systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 11, pp 1610-1617, 1996.

- 
- [16] G.W.K. Chang, W.M. Grady, "Minimizing harmonic voltage distortion with multiple current constrained active power line conditioners", 1996 IEEE/PES Summer Meeting, Denver, Colorado, 28 juillet - 1 août 1996.
- [17] B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 46, No 5, pp960–71, 1999.
- [18] L. H. Tey, P. L. So, Y.C. Chu, "Adaptive neural network control of active filters", Electric Power Systems Research, Vol 74, Issue 1, pp 37-56, April 2005.
- [19] A. Chaoui, F. Krim, J. Gaubert, L. Rambault, "DPC controlled three-phase active filter for power quality improvement", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol 30, Issue 8, Pages 476-485, October 2008.
- [20] C. Anna, T. Gilber, I. Piotr, "Recent developments in the sparse Fourier transform: A compressed Fourier transform for big data [J] ". IEEE Signal Processing Magazine, Vol 31, No 5, pp 91-100, 2014.
- [21] M. L. Na, Z. G. Zhou, P.P. Li, "Wideband spectrum sensing at low sampling rate based on the sparse Fourier transform[J] ", Applications of Electronic Technique, Vol 41, No 11, pp 85-88, 2015.
- [22] A. A. Abdoos, P. Khorshidian Mianaei, and M. Rayatpanah Ghadikolaie, "Combined VMD-SVM based feature selection method for classification of power quality events", Appl. Soft Comput. J., vol. 38, pp. 637–646, 2016.
- [23] O. Ozgonenel, T. Yalcin, I. Guney, and U. Kurt, "A new classification for power quality events in distribution systems", Electric power systems research, vol. 95, pp. 192–199, 2013.
- [24] R. Igual, C. Medrano, F. J. Arcega, G. Mantescu, "Integral mathematical model of power quality disturbances", Proceedings of International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, Ljubljana, Slovenia, Mai 2018.
- [25] U. Singh, S. N. Singh, "Optimal Feature Selection via NSGA-II for Power Quality Disturbances Classification", IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol 14, no 7, pp. 2994–3002, 2018.
- [26] [17] S. Jamali, A. R. Farsa, and N. Ghaffarzadeh, "Identification of optimal features for fast and accurate classification of power quality disturbances", Measurement, vol. 116, pp. 565–574, 2018.
- [27] J. Li, Z. Teng, Q. Tang, and J. Song, "Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using Double Resolution S-Transform and DAG-SVMs", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol 65, no 10, pp 2302–2312, Octobre 2016.
- [28] T. Chakravorti and P. K. Dash, "Multiclass power quality events classification using variational mode decomposition with fast reduced kernel extreme learning machine-based feature selection", IET Science, Measurement & Technology, vol 12, no 1, pp 106–117, 2018.
- [29] A. Kalair, N. Abas, A. R. Kalair, Z.Saleem, N. Khan, "Review of harmonic analysis, modeling and mitigation techniques", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol, 78, pp 1152-118, October 2017.
- [30] R. V. Doyran, M. Sedighzadeh, A. Rezazadeh, S. M. M. Alavi, "Optimal allocation of passive filters and inverter based DGs joint with optimal feeder reconfiguration to improve power quality in a harmonic polluted microgrid", Renewable Energy Focus, Vol 32, pp 63-78, Mars 2020.
- [31] M.H. Bollen, I.Y. Gu, S. Santoso, M.F. McGranaghan, P.A. Crossley, M.V. Ribeiro, P.F. Ribeiro, "Bridging the gap between signal and power", IEEE Signal Processing Magazine, Vol 26, No 4, pp 12-31, Juillet 2009.
- [32] E. Styvaktakis, M.H. Bollen, I.Y. Gu, "Expert system for classification and analysis of power system events", IEEE Transactions on Power Delivery, Vo 17, No 2, pp 423-428, avril 2002.
-

- 
- [33] P. Meena, K.U. Rao, D. Ravishankar, "A modified simple algorithm for detection of voltage sags and swells in practical loads", IEEE International Conference on Power Systems ICPS'09, Kharagpur, India, pp 1-6, 27-29 décembre 2009.
- [34] M.B. Latran, A. Teke, "A novel wavelet transform based voltage sag/swell detection algorithm", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol 7, pp 131-139, October 2015.
- [35] J. G. M. S. Decanini, M. S. Tonelli-Neto, F. C. V. Malange, C. R. Minussi, "Detection and classification of voltage disturbances using a Fuzzy-ARTMAP-wavelet network", Electric Power Systems Research, Vol 81, No 12, pp 2057-2065, December 2011.
- [36] C. Venkatesh, D.V.S.S. Siva Sarma, M. Sydulu, " Classification of voltage sag, swell and harmonics using S-transform based modular neural network", 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Bergamo, Italy, pp. 1–7, 26-29 Septembre 2010.
- [37] D. G. Lieberman, R.J. R. Troncoso, R.A. O. Rios, A. G. Perez, E. C. Yepez, "Techniques and methodologies for power quality analysis and disturbances classification in power systems: a review", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol 5, No 4, pp 519–529, 2011.
- [38] H. Eristi, A. Ucar, Y. Demir, "Wavelet-based feature extraction and selection for classification of power system disturbances using support vector machines", Electric Power Systems Research, Vol 80, No 7, pp 743-752, Juillet 2010.
- [39] E. A. Nagata, D. D. Ferreira, C. A. Duque, A. S. Cequeira, "Voltage sag and swell detection and segmentation based on Independent Component Analysis", Electric Power Systems Research, Vol 155, pp 274-280, Février 2018,
- [40] S.A. RUFUS, "Power quality events analysis using wavelet transform", Thèse de master, Faculty of Electrical and Electronic Engineering Universiti Tun Hussein Onn, Malaysia, juillet 2012.
- [41] L. Conrad, K. Little, and C. Grigg, "Predicting and preventing problems associated with remote fault-clearing voltage dips", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 27, no. 1, pp. 167–172, Février 1991.
- [42] C. Becker, W. Braun, K. Carrick, T. Diliberti, C. Grigg, J. Groesch, B. Hazen, T. Imel, D. Koval, D. Mueller, T. St. John, L. E. Conrad, "Proposed Chapter 9 for predicting voltage sags (dips) in revision to IEEE Std 493, the Gold Book", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 3, pp. 805–821, Juin. 1994.
- [43] M. H. J. Bollen, "Fast assessment methods for voltage sags in distribution systems," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp. 1414– 1432, Decembre 1996.
- [44] M. H. J. Bollen, "Additions to the method of critical distances for stochastic assessment of voltage sags," 1999 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, vol. 2, pp. 1241-1246, 31 Janvier – 4 Février 1999.
- [45] C. H. Park, G. Jang, "Stochastic estimation of voltage sags in a large meshed network", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 3, pp. 1655-1664, juillet 2007.
- [46] X. Zambrano, A. Hernandez, R. M. de Castro, M. Izzeddine, "Comparison of voltage sags prediction methods in power networks", IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy, 10–13, pp. 89-94, Juin 2015.
-

- 
- [47] B. N. C. Nvan Cruz ; P. A. Lavega ; R. C. O. Jordan, "Overview of methods for voltage sag performance estimation", 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Belo Horizonte, Brazil, pp 508-512, Octobre 2016
- [48] Y. Mohammadi, A. Salarpour, R. C. Leborgne, "A novel method for voltage-sag source location using a robust machine learning approach", *Electric Power Systems Research*, Vol 145, pp 122-136, Avril 2017.
- [49] Y. Mohammadi, A. Salarpour, R. C. Leborgne, "Comprehensive strategy for classification of voltage sags source location using optimal feature selection applied to support vector machine and ensemble techniques", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol 124, pp 1-50, janvier 2021.
- [50] E.Jamil, S.Hamee, B.Jamil, Qurratulain, "Power quality improvement of distribution system with photovoltaic and permanent magnet synchronous generator based renewable energy farm using static synchronous compensator", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 35, pp 98-116, October 2019.
- [51] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M.D. Bazilian, N. Wagner, R. Gorini, "The role of renewable energy in the global energy transformation", *Energy Strategy Reviews*, Volume 24, pp 38-50, April 2019,
- [52] X. Deng, T. Lv, "Power system planning with increasing variable renewable energy: A review of optimization models", *Journal of Cleaner Production*, Volume 24610, February 2020.
- [53] R. Bayindir, S.Demirbas, E.Irmak, U.Cetinkaya, A.Ova, M.Yesil, "Effects of renewable energy sources on the power system", *IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Bulgaria, September 2016.
- [54] IRENA, *Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050*, 2019, Abu Dhabi, <https://irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>.
- [55] A. Rezvani, M. Izadbakhsh, M. Gandomkar, "Microgrid dynamic responses enhancement using artificial neural network-genetic algorithm for photovoltaic system and fuzzy controller for high wind speeds", *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, vol. 29, pp. 309-332, 2016.
- [56] H. R. Baghaee, M. Mirsalim, G. B. Gharehpetian and H. A. Talebi, "Unbalanced harmonic power sharing and voltage compensation of microgrids using radial basis function neural network-based harmonic power-flow calculations for distributed and decentralised control structures", in *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 7, pp. 1518-1530, 2018.
- [57] N. Chettibi, A. Mellit, G. Sulligoi and A. Massi Pavan, "Adaptive Neural Network-Based Control of a Hybrid AC/DC Microgrid", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 9, No. 3, pp. 1667-1679, Mai 2018,
- [58] M. Vijayakumar and S. Vijayan, "Photovoltaic based three-phase four-wire series hybrid active power filter for power quality improvement", *Indian Journal of Engineering & Material Science*, Vol. 21, pp. 358-370. Aout 2014.
- [59] V. Kamatchi Kannan and N. Rengarajan, "Photovoltaic Based Three-Phase Three-Wire DSTATCOM to improve Power Quality", *Journal of Scientific & Industrial Research*, Vol. 72, pp. 446-453, Juillet 2013.
- [60] A. Senthil Kumar, S. Rajasekar, P. Ajay-D-Vimal Raj, "Power Quality Profile Enhancement of Utility Connected Microgrid System Using ANFIS-UPQC", *Procedia Technology*, vol. 21, pp. 112-119, 2015.
- [61] V. Rajakumar, K. Anbukumar, "Enhancement of power quality using double-band hysteresis controller for the grid integrated renewable energy system", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol 28, No 11, pp 1-17, 2018.
-

- 
- [62] S. Peyghami, H. Mokhtari, P. C. Loh, P. Davari, F. Blaabjerg, "Distributed Primary and Secondary Power Sharing in a Droop-Controlled LVDC Microgrid With Merged AC and DC Characteristics", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2284-2294, Mai 2018.
- [63] C. Bhattacharjee and B. K. Roy, "Advanced fuzzy power extraction control of wind energy conversion system for power quality improvement in a grid tied hybrid generation system," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 5, pp. 1179-1189, 2016.
- [64] S. K. Dash and P. K. Ray, "Power quality improvement utilizing PV fed unified power quality conditioner based on UVPI and PR-R controller," *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 3, no. 3, pp. 243- 253, Septembre, 2018.
- [65] S. Mishra and P. K. Ray, "Power Quality Improvement Using Photovoltaic Fed DSTATCOM Based on JAYA Optimization", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 1672-1680, Octobre 2016.
- [66] T. Vantuch, S. Mišák, T. Jeżowicz, T. Buriánek and V. Snášel, "The Power Quality Forecasting Model for Off-Grid System Supported by Multiobjective Optimization", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 12, pp. 9507-9516, Décembre 2017.
- [67] C. Huang, J. Gu, H. Liu, Y. Lu and J. Luo, "Economical optimization of grid power factor using predictive data," *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 6, no. 1, pp. 258-267, Janvier 2019.
- [68] M.O. Oliveira, J.H. Reversat, L.A. Reynoso, "Wavelet Transform Analysis to Applications in Electric Power Systems", *Wavelet Transform and Complexity*, chap 5, pp 1-18, Mai 2019.
- [69] L. Lau, "Wavelet packets based denoising method for measurement domain repeat-time multipath filtering in GPS static high-precision positioning", *GPS Solut*, volume 21, pp 461–474, Avril 2017.
- [70] R. Bhavani; N. R. Prabha, "A hybrid classifier for power quality (PQ) problems using wavelets packet transform (WPT) and artificial neural networks (ANN)" *IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, Srivilliputhur, India, pp 1-7, 2017
- [71] W. K. Lee, M. M. Ratnam, Z. A. Ahmad, "Detection of chipping in ceramic cutting inserts from workpiece profile during turning using fast Fourier transform (FFT) and continuous wavelet transform (CWT) ", *Precision Engineering*, Volume 47, pp 406-423, January 2017.
- [72] S. Zhou, B. Tang, R. Chen, "Comparison between Non-stationary Signals Fast Fourier Transform and Wavelet Analysis", *International Asia Symposium on Intelligent Interaction and Affective Computing*, Wuhan, China, 8-9 Decembre. 2009.
- [73] D. De Yong, S. Bhowmik, F. Magnago, " An effective Power Quality classifier using Wavelet Transform and Support Vector Machines", *Expert Systems with Applications*, Vol 42, Issues 15–16, pp 6075-6081, September 2015.
- [74] S. Khokhar, A.A. Mohd Zin, A. P. Memon, A. S. Mokhtar, "A new optimal feature selection algorithm for classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and probabilistic neural network", *Measurement*, Vol 95, pp 246-259, January 2017.
- [75] Abdelazeem A. Abdelsalam, Azza A. Eldesouky, Abdelhay A. Sallam, "Classification of power system disturbances using linear Kalman filter and fuzzy-expert system", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol 43, Issue 1, pp 688-695, December 2012.
- [76] P. Kanirajan, V.S. Kumar, "Wavelet-Based Power Quality Disturbances Detection and Classification Using RBFNN and Fuzzy Logic", *International Journal of Fuzzy Systems*, Vol 17, Issue 4, pp 623–634, December 2015.
-

- [77] M.B.I. Reaz, F. Choong, M.S. Sulaiman, F.M. Yasin, M. Kamada, "Expert system for power quality disturbance classifier", *IEEE Trans. Power Deliv*, Vol 22, Issue3, pp. 1979–1988, 2007.
- [78] G.S. Hu, J. Xie, F.F. Zhu, "Classification of power quality disturbances using wavelet and fuzzy support vector machines". *IEEE Proc. Fourth Int. Conf. Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, pp. 3981–3984, 18–21 August 2005.
- [79] S. Upadhyaya, S. Mohanty, "Localization and Classification of Power Quality Disturbances using Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform and Data Mining based Classifiers", *IFAC-PapersOnLine*, Vol 49, Issue 1, pp 437-442, 2016.
- [80] K. Manimala, K. Selvi, "Power Disturbances Classification Using S-Transform Based GA–PNN", *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, Vol 96, Issue 3, pp 283–295, September 2015.
- [81] J. Li, Z. Teng, Q. Tang, J. Song, "Detection and classification of power quality disturbances using double resolution S-transform and DAG-SVMs", *IEEE Trans. Instr. Meas.*, Vol 65, Issue 10, pp 2302 – 2312, 2016.
- [82] R. Ahila, V. Sadasivam, K. Manimala, "An integrated PSO for parameter determination and feature selection of ELM and its application in classification of power system disturbances", *Applied Soft Computing*, Vol 32, pp 23-37, July 2015.
- [83] J. A. Bosnic, G. Petrovic, A. Putnik, P. Mostarac "Power quality disturbance classification based on wavelet transform and support vector machine", 11th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia, pp 9-13, 2017.
- [84] D. De Yong, S. Bhowmik, F. Magnago, "An effective Power Quality classifier using Wavelet Transform and Support Vector Machines", *Expert Systems with Applications*, Vol 42, Issues 15–16, pp 6075-6081, 2015.
- [85] A. Rahmati, "An adaptive differential relay for ct saturation based on wavelet Transform", *International Conference on Advances in Energy Engineering*, pp 1-619, Beijing, China, 20 June 2010, ..
- [86] A.O. Ahmed, "Transmission Lines Protection Techniques Based on Wavelet Transform", *PHD Thesis*, Department of Electrical and Computer Engineering, Calgary, Alberta, April 2003.
- [87] O. Chaari, M. Meunier, F. Brouaye, "Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distribution systems relaying", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 11, Issue 3, pp 1301-1308, Jul 1996.
- [88] C.T. Hsieh, J.M. Lin, S.J. Huang, "Enhancement of islanding-detection of distributed generation systems via wavelet transform-based approaches", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 30, Issue 10, pp 575-580, December 2008.
- [89] M.E. Mohammed, "High-Speed Differential Busbar Protection Using Wavelet-Packet Transform", *IEE Proceedings- Generation, Transmission and Distribution*, Vol.152, No.6, pp. 927-933, November 2005.
- [90] M. Aktas, V. Turkmenoglu, "Wavelet-based switching faults detection in direct torque control induction motor drives", *IET Science, Measurement & Technology*, Volume 4, Issue 6, pp 303-310, November 2010.
- [91] S.A. Saleh, M.A. Rahman, "Testing of a Wavelet-Packet-Transform-Based Differential Protection for Resistance-Grounded Three-Phase Transformers", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.46, No.3, pp 1109-1117, June 2010.
- [92] M. O. Oliveira, R. H. Salim, A. S. Bretas, Differential protection of three-phase transformers using wavelet transforms, *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, pp 1-6, Bogota, Colombia, 13-15 Aout. 2008,
- [93] M. F. Abbas, L. Zhiyuan, H. Zhiguo, Z. "Guanjun, Inrush current discrimination in power transformer differential protection using wavelet packet transform based technique", *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pp 25944 -28948, Xi'an, China, 25-28 Oct. 2016.

- 
- [94] O. Ozgonenel, "Protection of power transformers by using continuous wavelet transform, IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference", pp 1106-1109, Malaga, Spain, 16-19 May 2006.
- [95] M.O. Oliveira, A.S. Bretas, G.D Ferreyra, " Adaptive differential protection of three-phase power transformers based on transient signal analysis", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 57, pp 366-374, May 2014.
- [96] T. Suman, O.P. Mahela, S.R. Ola, Detection of transmission line faults in the presence of wind power generation using discrete wavelet transform, IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), pp 1-6, Bikaner, India. 25-27 Nov, 2016.
- [97] S. Biswas, Kundan Kumar, A. Ghosal, P. K. Nayak, "Fault detection and classification for TCSC compensated transmission lines using wavelet energy", 4th International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT), 15-17, pp 1-5, Dhanbad, India, March, 2018.
- [98] Y. Manjusree, R. K. Goli, "Fault detection of a hybrid energy source integration with multiterminal transmission line using wavelet analysis, International Conference on Recent Trends in Electrical", Electronics and Computing Technologies (ICRTEECT), Warangal, India, 30-31 July 2017.
- [99] Z. Ji, P. Zhang, Z. Zhao, "Application of Wavelet Neutral Network and Rough Set Theory to Forecast Mid-Long-Term Electric Power Load", First International Workshop on Education Technology and Computer Science, pp 1104-1108, Wuhan, Hubei, China, 7-8 March 2009.
- [100] L. Zhuang, H. Liu, J. Zhu, S. Wang, Y. Song, "Comparison of forecasting methods for power system short-term load forecasting based on neural networks", IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), pp 114-119, , Ningbo, China, 1-3 Aug. 2016.
- [101] S.J. Yao, Y.H. Song, L.Z. Zhang, X.Y. Cheng. "Wavelet transform and neural networks for short-term electrical load forecasting", Energy Conversion and Management, Volume 41, Issue 18, pp 1975-1988, December 2000.
- [102] L. Wang, L. Dong, Y. Hao, X. Liao, "Wind power prediction using wavelet transform and chaotic characteristics", World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, pp 1-5, Nanjing, China, 24-26 Sept. 2009.
- [103] S.K. Aggarwal, L.M. Saini, A. Kumar, "Price Forecasting Using Wavelet Transform and LSE Based Mixed Model in Australian Electricity Market". International Journal of Energy Sector Management, Vol.2, No.4, pp. 521-546, 2008.
- [104] P.T.T. Binh, N.T. Hung, P.Q. Dung, L.H. Hee, "Load forecasting based on wavelet transform and fuzzy logic", IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), pp 1-6, Auckland, New Zealand, 30 Oct.-2 Nov. 2012.
- [105] E.Y. Hamid, Z. Kawasaki, "Wavelet Packet Transform for RMS Values and Power Measurements", IEEE Power Engineering Review, Vol.21, No.9, pp 49-51, September 2001.
- [106] E.Y. Hamid, Z. Kawasaki, "Instrument for the Quality Analysis of Power Systems Based on the Wavelet Packet Transform", IEEE Power Engineering Review, Vol.22, No.3, pp 52-54, mars 2002.
- [107] W.G. Morsi, M. E. El-Hawary, "The Most Suitable Mother Wavelet for Steady-State Power System Distorted Waveforms", Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp 17-22, 4-7, Niagara Falls, Canada, May 2008.
- [108] S. Kashyap, A.K. Singh, Most suitable mother wavelet for measurement of power system harmonics using DWT in view of IEEE Standard 1459-2000, 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, pp 1-6, Wollongong, NSW, Australia, 28 Sept.-1 Oct. 2008.
-

- 
- [109] J. Pan, M. Qi, "Study on Short-Term Load Forecasting of Distributed Power System Based on Wavelet Theory", 10th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), pp 170-173, Changsha, China 10-11 Feb, 2018.
- [110] L. Zhao, Y. Sun, "Noise elimination in partial discharge on-line monitoring for transformer based on wavelet transform", International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment, pp 1-4, Henan, China, 7-9 november 2010.
- [111] H.R. Mirzaei, A. Akbari, M. Allahbakhshi, M. Kharezi, "An experimental review on application of wavelet transform on partial discharge evaluation of power Wavelet Transform and Complexity transformers". 10th IEEE International Conference on Solid Dielectrics, pp 1-4, Potsdam, Germany, 4–9 July, 2010.
- [112] A. Sarikhani, A. Darabi, M. Banejad, "Partial discharge locating in power transformer using wavelet transform of bushing and grounded neutral currents", Australasian Universities Power Engineering Conference, pp 1-6, Perth, Australia, , 9-12 Dec. 2007.
- [113] J. Seo, H. Ma, T.K. Saha, "Differential partial discharge extraction technique for online power transformer insulation assessment", IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, pp 1-5, 27-31, National Harbor, USA, July 2014.
- [114] K. Shanlin, K. Yuzhe, Z. Huanzhen, "Application of wavelet transform for fault pattern recognition and analysis of power system generator", Chinese Control and Decision Conference, pp 3908-3911, Guilin, China, 17-19 June 2009
- [115] C. Jaipradidtham, S. Pasomkusolsil, "Harmonic analysis of electromagnetic transients in 500 kV single circuit transmission system using discrete wavelet transform", Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference New Delhi, . pp. 1-4, India, 2008.
- [116] M. Yang, Y. Yang, "A study of transient-based protection using wavelet energy entropy for power system EHV transmission line", International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition, Qingdao, pp. 283-288, China. 2010.
- [117] M.J.B. Reddy, D.K. Mohanta, B.M. Karan, "Power System Disturbance Recognition Using Wavelet and S-Transform Techniques", International Journal of Emerging Electric Power Systems, Vol.1, No.2, pp. 1-16, November 2004.
- [118] M.J.B. Reddy, D.K. Mohanta, "Detection, Classification and Localization of Power System Impulsive Transients Using S–Transform", 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp. 373-376, Prague, Czech Republic, May 16-19, 2010.
- [119] N.L. Jain, R. Priyanka, P. Keerthy, P. Maya, P. Babu, "Empirical wavelet transform for harmonic detection under dynamic condition", International Conference on Circuit , Power and Computing Technologies (ICCPCT), pp. 1-5, Kollam, India, 2017.
- [120] P. Ray, D.P. Mishra , K.Dey, P. Mishra, "Fault detection and classification of a transmission line using Discrete Wavelet Transform & Artificial Neural Network", International Conference on Information Technology (ICIT), pp 178-183, Bhubaneswar, India. 2017.
- [121] R. Wilson, A.D. Calway, E.R.S. Pearson, A generalized wavelet transform for Fourier analysis: the multiresolution Fourier transform and its application to image and audio signal analysis, IEEE Transactions on Information Theory, Volume 38, Issue 2, March 1992.
- [122] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, "Wavelet Toolbox 4 for use with Matlab", The mathworks Inc, 2007.
- [123] C. Parameswariah, M. Cox, "Frequency Characteristics of Wavelets", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.17, No.3, pp. 800–804, July 2002.
-

- 
- [124] S. Ekici, "Classification of power system disturbances using support vector machines", *Expert Systems with Applications*, Vol 36, Issue 6, pp 9859-9868, August 2009.
- [125] [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45936-ieee-9-bus?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45936-ieee-9-bus?s_tid=srchtitle).
- [126] Escalera, S, O. Pujol, and P. Radeva. "On the decoding process in ternary error-correcting output codes." *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. 32, Issue 7, pp. 120–134, 2010.
- [127] A. Rahmani, L. Slimani and T. Bouktir, " Unbalanced Load Flow With Hybrid Wavelet Transform And Support Vector Machine Based Error-Correcting Output Codes For Power Quality Disturbances Classification Including Wind Energy", *Electrical Engineering & Electromechanics*, Vol 6, pp 62-69, 2019.
- [128] M. Biswal, P. K. Dash, "Measurement and classification of simultaneous power signal patterns with an S-transform variant and fuzzy decision tree," *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 9, no. 4, pp. 1819–1827, Nov. 2013.
- [129] X. Jianhong, "Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité", Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 1994.
- [130] S. Sriram, S. Nitin, K. M. M. Prabhu, M. J. Bastiaans, Signal denoising techniques for partial discharge measurements. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol 12, Issue 6, Decembre 2005.
- [131] O. V. Shentov, S. K. Mitra, U. Heute, A. N. Hossen, "Subband DFT — Part I: Definition, interpretation and extensions", *Signal Processing*, Vol 41, Issue 3, pp 261-277, February 1995.
- [132] M. Muhammad Zaid, M.U. Malik, M.S. Bhatti, H. Razzaq, M.U. Aslam, "Detection and Classification of Short and Long Duration Disturbances in Power System", *Journal of Electrical Systems*, Vol 13, Issue 4, pp 779-789, December 2017.
- [133] M. Malvoni, M. G. De Giorgi, P. M. Congedo, "A regional hybrid GOA-SVM model based on similar day approach for short-term load forecasting in Assam, India", *Energy*, Vol 145, pp710-720, February 2018.
- [134] I. P. Panapakidis, G. C. Christoforidis, N. Asimopoulos, "Combining wavelet transform and support vector regression model for day-ahead peak load forecasting in the Greek power system", *IEEE International Conference Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, pp 1-6, Milan, Italy, 6-9 June 2017.
- [135] A. J. Al-Shareef, E. A. Mohamed, E. Al-Judaibi, "One Hour Ahead Load Forecasting Using Artificial Neural Network for the Western Area of Saudi Arabia", *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol 2, Issue 1, pp 29-34, 2008.
- [136] M. Rafiei, T. Niknam, M. H. Khooban, "A novel intelligent strategy for probabilistic electricity price forecasting: Wavelet neural network based modified dolphin optimization algorithm," *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 31, no. 1, pp. 301-312, 2016.
- [137] D. Boubacar, " Proposition, intégration dans un système de gestion de réseau intelligent et validation expérimentale d'une méthode de prédiction pour un système d'énergies renouvelables", Université du Québec à Trois-Rivières, Septembre, 2015.
- [138] T. HONG et S. FAN, "Probabilistic electric load forecasting : A tutorial review", *International Journal of Forecasting*, Issue 32, No 3, pp. 914-938, 2016.
- [139] K. Le, "Gestion optimale des consommations d'énergie dans les bâtiments", Thèse de l'Ecole Doctorale
-

Electronique, Electrotechnique, Automatique, Télécommunications, Signal», Institut Polytechnique de Grenoble et Université de Danang, 2008.

- [140] J.Hopfield, "Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, vol 79, Issue 8, pp. 2554, 1982.
- [141] Z. Zhi-Hua, X. Ying, "The application of artificial neural network in HVAC system", Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2005.
- [142] S. A. Kalogirou, "Applications of artificial neural-networks for energy systems", Applied Energy, Vol 67, Issue 1-2, pp 17-35, 2000.
- [143] Hu Qinhua, A. Dong, K. Li, A. T. P. So, "Two ANN-Based Models for a Real MVAC System", International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCom, Shanghai, China, September 2007.
- [144] R. Lamedica, A. Prudenzi, M. Sforna, M. Caciotta, V.O. Cencelli, "A neural network based technique for short-term forecasting of anomalous load periods", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 11, Issue 4, pp 1749-1756, 1996.
- [145] K. Hornik, M. Stinchcombe, H. White, "Multilayer feedforward networks are universal approximators", Neural Networks, Vol 2, Issue 5, pp 359-366, 1989.
- [146] M. Krarti, "An Overview of Artificial Intelligence-Based Methods for Building Energy Systems", Journal of Solar Energy Engineering, Vol 125, Issue 3, pp 331-342, 2003.
- [147] [https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28684-electricity-load-and-price-forecasting-webinar-case-study?s\\_tid=srchtitle](https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/28684-electricity-load-and-price-forecasting-webinar-case-study?s_tid=srchtitle).
- [148] C. Guan, P. B. Luh, L. D. Michel, Y. Wang, P. B. Friedland, "Very Short-Term Load Forecasting: Wavelet Neural Networks With Data Pre-Filtering", IEEE Transactions on Power Systems, Vol 28, Issue 1, pp 30-41, 2013.

## ملخص:

قبل القرن التاسع عشر وقبل اكتشاف الموجيات، كان تحليل فوري هو الأسلوب الوحيد الذي يسمح بتفكيك الإشارة وإعادة بنائها دون فقدان المعلومات. مع التطور السريع لاستخدامات الكهرباء في الصناعة، هناك متطلبات على جودة الطاقة المراد توفيرها. أصبحت جودة الطاقة قضية مهمة لمستخدمي الكهرباء وعملائهم. يمكن أن تتأثر هذه الجودة بسهولة بسبب تشوه مصدر الطاقة للشبكة الكهربائية مما قد يؤدي إلى ارتفاع التكاليف وخلق العديد من المشاكل. تم تطبيق الموجيات لأول مرة في أنظمة شبكات الطاقة في عام 1994، ومنذ ذلك العام زاد عدد المنشورات في هذا المجال. يتم تفسير تحويل الموجيات أيضًا على أنه عملية تصفية إشارة تم تحليلها. لهذا، يمكن أن تلعب الموجيات دورًا مهمًا في تحسين جودة الطاقة. قدمت النماذج المقدمة ونتائج المحاكاة أداءً جيدًا، مما يعني أن التقنيات القائمة على التحويل الموجي يمكن أن تساعد في حل المشكلات المختلفة الموجودة في الشبكات الكهربائية.

**كلمات مفتاحية:** الموجيات, الشبكات الكهربائية, جودة الطاقة, دعم شاحنات النقل, الموجية ديبوشي

## Résumé :

Avant le XIXe siècle et avant la découverte des ondelettes l'analyse de Fourier était la seule technique permettant la décomposition d'un signal et sa reconstruction sans perte d'information. Avec Le développement rapide des usages de l'électricité dans l'industrie induit des exigences dans la qualité de l'énergie à fournir. La qualité de l'énergie est devenue un enjeu important pour les utilisateurs d'électricité et leurs clients. Cette qualité peut être facilement perturbée par la distorsion de l'alimentation du réseau électrique qui peut entraîner des coûts élevés et créer de nombreux problèmes. Les ondelettes ont d'abord été appliquées dans les systèmes des réseaux électriques en 1994, et depuis cette année, le nombre de publications dans ce domaine a augmenté. La transformation en ondelette est aussi interprétée comme étant un processus de filtrage de signal analysé. Pour cela, les ondelettes peuvent jouer un rôle important pour améliorer la qualité d'énergie. les modèles présentés et les résultats de simulation a fourni de bonnes performances cela signifie que les techniques basées sur la transformée en ondelettes pourraient aider résoudre les différents problèmes existant dans les réseaux électriques.

**Mots Clés :** Transformée en ondelette, Réseaux électrique, Qualité d'énergie, Machine à vecteur de support, Daubechies

## Abstract:

Before the 19th century and before the discovery of wavelets, Fourier analysis was the only technique allowing the decomposition of the signal and its reconstruction without loss of information. With the rapid development of the uses of electricity in industry, the quality of energy has become an important issue for electricity users and their customers. This quality can be easily disturbed by the distortion of the power supply to the electrical network which can lead to high costs and create many problems. Wavelets were first applied in power systems in 1994, since this year the number of publications in this field has increased. The wavelet transformation is also interpreted as being an analyzed signal filtering process. For this, wavelets can play an important role to improve the quality of energy. The models presented and the simulation results provided a good performance, which means the techniques based on the wavelet transform could help to solve the various problems existing in the electrical networks.

**Key Words :** wavelet transform, Power system, Quality of energy, support vector machine, Daubechies