



*Université de Ghardaïa*

N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département des Sciences et Technologie

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**

## **MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *électromécanique*

**Spécialité :** *maintenance industrielle*

**Par :**

Arif Mohamed lamine

Ben Attalah seghir

## **Thème**

**ETUDE ET IMPLEMENTATION DES TECHNIQUES DE FILTRAGE POUR UN  
RESEAU ELECTRIQUE AVEC UNE PRODUCTION D'ENERGIE EOLIENNE**

**Soutenu publiquement le : 21/06/2018**

**Devant le jury :**

<b>Benounna saleh</b>	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>Bahri ahmed</b>	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Examinateur</b>
<b>Ferkous khaled</b>	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Examinateur</b>
<b>SKANDER BOUREGHDA</b>	MAA	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire 2017/2018**

## ملخص

إن مشكل التوافقيات في شبكات توزيع الطاقة الكهربائية أصبح عائقاً، خاصة مع الاستخدام المتزايد للحمولات الغير خطية .

. في السنوات الأخيرة شهدت الطاقة الكهربائية طلباً متزايداً وذلك لتلبية المتطلبات اليومية والصناعية هذه الزيادات تكون مصحوبة باحتمال ندرة المواد الأولية المستعملة في توليد هذه الأخيرة وكذلك بزيادة تأثيراتها على المناخ والبيئة ، مما يستوجب تسليط الضوء على استعمال الطاقات المتجددة التي تعتبر حلاً مثالياً . من بين هذه الطاقات المتجددة الرياح والتي هي موضوع بحثنا

. أدى الاستخدام المتزايد لأجهزة الكترونيات القدرة في الأنظمة الكهربائية إلى زيادة مشكل التوافقيات ينشأ التشوه التوافقي بسبب الحمولات الغير الخطية المتصلة بالشبكة والتي تمتص التيارات غير جيبية . هذا التلوث يمكن أن يؤدي إلى تسخين الكابلات والمعدات الكهربائية أو إلى التوقف المفاجئ للآلات . الدوارة ، أو حتى التدمير الكامل لجميع هذه المعدات

في هذا السياق ، تكمن دراسة هذه المذكرة حول استخدام الآلات الغير المتوازنة في نظام طاقة الرياح و . من ثم التصفية الموازية لوجود هذه الأخيرة

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحليل وتصفية التوافقيات في شبكة كهربائية ذات محطة رياح متصلة . بحمولة غير خطية

# Résumé

L'énergie électrique, par sa facilité d'utilisation, de régulation et d'automatisation, est devenue indispensable à la vie quotidienne.

Ces dernières années, nous assistons à une augmentation sans cesse croissante de la demande de la puissance électrique afin de répondre aux exigences industrielles et quotidiennes. Cette augmentation est accompagnée par les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique et l'environnement dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables qui représentent une solution importante. Parmi les nouvelles sources d'énergie, on trouve l'énergie éolienne qui fait l'objet de ce travail.

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire même la destruction totale de tous ces équipements [5].

Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone dans un système éolien puis le filtrage parallèle à la présence de ce dernier. L'objectif principal de ce travail est de faire l'analyse et le filtrage d'un réseau électrique avec une production éolienne connectée à une charge non linéaire.

# Abstract

The problem of harmonic pollution in electrical distribution networks has become more and more frequent with the use of nonlinear loads (diodes or thyristors, switching power supplies). Active energy filtering is one of the most effective solutions to this issue. The contribution of this thesis to active filtration is the development of a control strategy based on the proposed control scheme to improve the performance of the active three-phase filter. In the beginning, we presented a study of harmonic pollution. We then introduced the most commonly used reference identification algorithms, and listed the most commonly used control techniques. In addition, we have shown how current APFs can be visualized. After providing a description of methods of determining harmonics using a voltage reflector. Comments and comparative discussions were provided. In the last step, we have applied the proposed control technique to obtain as well as improve the quality of the filter. On the other hand, this approach is compared with the traditional APF. The algorithm was validated through simulations. The results obtained showed the effectiveness of the proposed scheme and confirmed theoretical developments of balanced, unbalanced loads.

# dédicace

**Je dédie ce modeste travail à :**

**Celle qui ne pense qu'à moi : ma très chère mère ;**

**Celui qui n'a cessé de m'aider avec indéfectible soutien :  
mon cher père ;**

**Mes frères ;**

**Mes sœurs ;**

**Toute ma grande famille ;**

**Tous mes amis.**

**A toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de  
loin à l'élaboration de ce travail.**

*SEGHIR*

# dédicace

**Je dédie ce modeste travail à :**

**Celle qui ne pense qu'à moi : ma très chère mère ;**

**Celui qui n'a cessé de m'aider avec indéfectible soutien :  
mon cher père ;**

**Mes frères ;**

**Mes sœurs ;**

**Toute ma grande famille ;**

**Tous mes amis.**

**A toutes les personnes qui ont contribuées de près ou de  
loin à l'élaboration de ce travail.**

*MOHAMEDE LAMINE*

# Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu et très chaleureusement notre promoteur, le M<sup>r</sup> SKANDER pour avoir accepté de diriger notre travail, pour ses précieux conseils, pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité. Grâce à lui, notre travail s'est déroulé dans les meilleures conditions.

Merci M<sup>r</sup> SKANDER pour votre volonté, votre conscience professionnelle et votre sérieux.

Nous remercions également les enseignants de département des Sciences et Technologies pour son excellent travail afin de faire de cette division un succès

Et à la fin merci à nos amis qui ont contribué de près ou de loin

## LISTE DES FIGURES

Figure	Titres	Pages
1.1	Creux de tension	6
1.2	Coupures brèves	6
1.3	Fluctuation de tension	7
1.4	Phénomène du flicker	7
1.5	Déséquilibre de tension	7
1.6	Surtensions transitoires	8
1.7	Harmoniques de tension.	9
1.8	Source de tension harmonique	14
1.9	Impédance harmonique	15
1.10	Diagramme de Fresnel des puissances	18
1.11	Circulation des courants harmoniques d'ordre 3 et multiples de 3 dans le conducteur du neutre	20
1.12	Four à arc alimenté en courant alternatif	22
1.13	Four à arc alimenté en courant continu	22
1.14	Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques	24
2.1	Transformateur à secondaire zigzag et atténuation des harmoniques multiples de 3	3
2.2	Montage de 2 ponts redresseurs	35
2.3	Principe de connexion du filtre actif	36
2.4	Filtre actif parallèle	36
2.5	Filtre actif série	38
2.6	Combinaison d'un filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle	38
2.7	Mise en série d'un filtre actif série avec un filtre passif parallèle	39
2.8	Combinaison d'un filtre actif parallèle avec un filtre actif série: Conditionneur actif de puissance	39
2.9	Schéma de principe de convertisseur à MLI	40
2.10	Système IPQC	41
2.11	Système PLC	42
3.1	Eolienne à axe vertical	47



3.2	Eolienne à axe horizontal	48
3.3	Principales composants de l'éolienne à axe horizontal	50
3.4	vitesse du vent et vitesse tangentielle en bout de pales	52
3.5	Coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite $\lambda$ pour différents types de turbines	53
3.6	Système de conversion éolien avec GACE à vitesse fixe	55
3.7	Système avec GADA pour l'opération à vitesse variable	56
3.8	Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable	57
3.9	Structure de la GADA à rotor bobiné	60
3.10	structure de Scherbius avec convertisseurs MLI	60
3.11	Bilans simplifiés des transferts d'énergie dans une machine à double alimentation lorsque la vitesse varie de la moitié au double de $\Omega$	63
4.1	Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q	68
4.2	Principe de la méthode (pq)	68
4.3	Principe de la commande par MLI	70
4.4	Commande conventionnelle par hysteresis	70
4.5	Commande par hystérésis modulé	71
4.6	shéma du système étudié	72
4.7	schéma de charge non linéaire alimentant une charge R-L connectée au réseau triphasé à trois fils	72
4.8	Les tensions de la source	73
4.9	Zoom des tensions de la source	73
4.10	Courant de la charge non linéaire $i_{ca}$	74
4.11	Courant de la source avant filtrage	74
4.12	Spectre harmonique du courant de la source	75
4.13	Courant de la source après filtrage	76
4.14	Analyse harmonique du courant de source après filtrage	76
4.15	Courant injecté par le filtre actif	77
4.16	Courant de la source après filtrage.	77
4.17	Analyse harmonique du courant de source après filtrage	77
4.18	Courant injecté par le filtre actif avec un zoom	78
4.19	Courant de la source après filtrage	79
4.20		

4.21	Analyse harmonique du courant de source après filtrage Courant injecté par le filtre actif	79
------	---	----

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titres	Pages
1.1	- Harmoniques dans un système triphasé équilibré	20
1.2	- Conséquences des harmoniques sur les éléments du réseau	27
1.3	- Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques	28
2.1	- Courants harmoniques d'une alimentation à découpage en fonction de l'impédance de source	34

## LISTE DES ACRONYMES

Abréviaton	Désignation
<b>THH</b>	Taux harmonique de rang h
<b>TDH</b>	Taux global de distorsion harmonique
<b>TDP</b>	Taux de distorsions pondérées
<i>MLI</i>	Modulation de Largeur d'impulsion
<b>IPQC</b>	Improved Power Quality AC-DC
<b>PLC</b>	Power Line Communication
<b>GAS</b>	Générateur Asynchrone
<b>GACE</b>	Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureui
<b>GARB</b>	Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné
<b>GADA</b>	Génératrice Asynchrone à double Alimentation
<b>GS</b>	Générateur Synchrone
<b>GSRB</b>	Générateur Synchrone à Rotor Bobiné
<b>GSAP</b>	Générateur Synchrone à Aimants Permanents
<b>GRC</b>	Générateur à réluctance commutée
<b>GFT</b>	Générateur à flux transversal

## LISTE DES NOTATIONS

Le tableau suivant résume les différents symboles utilisés le long de ce mémoire.

<b>Symboles</b>	<b>Dénomination</b>	<b>Unités</b>
$S_{eff}$	efficacité d'un signal	-
$C_h$	la composante harmonique de rang h	-
$V_h$	Valeur efficace de la tension harmonique d'ordre h	-
$I_h$	Valeur efficace du courant harmonique d'ordre h	[Am]
$F_p$	Le facteur de puissance	-
$E_c$	l'énergie cinétique	-

# Table des matières

ملخص.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract .....	iv
Dédicace.....	v
Remerciement.....	vii
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	xi
Liste des acronymes.....	xii
Liste des notations.....	xiii
INTRODUCTION GENERALE.....	01
CHAPITRE 01.....	04
1 - ETUDE DE LA POLLUTION HARMONIQUE	
1.1 - INTRODUCTION ET OBJECTIFS.....	04
1.1.1 - Préambule .....	04
1.1.2 - Objectifs.....	04
1.2 - DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATION ELECTRIQUE .....	04
1.2.1 - Creux de tension et coupures brèves.....	05
1.2.2 - Fluctuations de tension et flicker.....	05
1.2.3 - Déséquilibre de tension.....	06
1.2.4 - Surtensions transitoires.....	07
1.2.5 - Harmoniques et inter-harmoniques .....	08
1.3 - PERTURBATIONS HARMONIQUES.....	10
1.3.1 - Nature physique du phenomèna.....	10
1.3.2 - Définitions et aspects théoriques des phénomènes.....	11
1.3.3 - Harmoniques de courant et de tension.....	13
1.3.4 - Distorsion harmonique.....	14
1.3.5 - Facteur de puissance.....	17
1.3.6 - Harmoniques dans un système triphasé.....	19

1.3.7 – Interharmoniques.....	21
1.3.8 - ORIGINE DES PERTURBATIONS HARMONIQUES.....	23
1.3.9 - CONSÉQUENCES DES PERTURBATIONS HARMONIQUES ...	25
1.4– NORMES ET REGLEMENTATION.....	28
1.5- Conclusion.....	30
CHPITRE 02.....	29
2-SOLUTION DE DÉPOLLUTION DES HARMONIQUES	
2.1 INTRODUCTION.....	32
2.2 SOLUTIONS TRADITIONNELLES.....	32
2.2.1 Surdimensionnement de l’installation électrique.....	32
2.2.2 Augmentation de la puissance de court-circuit.....	32
2.2.3 Transformateur à couplage spécial.....	33
2.2.4 Modification du convertisseur pollua.....	34
2.2.4.1 Redresseurs dodécoph.....	34
2.2.4.2 Méthodes d’injection d’harmonique dans le neutre.....	35
2.2.4.3 Transformateurs de réjection de l'harmonique 3.....	35
2.3 SOLUTIONSNOUVELLES.....	35
2.3.1 Filtre actif ou conditionneur actif d’harmoniques.....	35
2.3.2 Filtre actif de puissance parallèle.....	36
2.3.3 Filtre actif de puissance série.....	37
2.3.4 Filtre actif de puissance hybride.....	37
2.3.4.1 Filtre actif de puissance série en parallèle avec des filtres passifs parallèles.....	38
2.3.4.2 Filtre actif de puissance série en série avec des filtres passifs parallèles.....	38
2.3.4.3 Conditionneur actif de puissance.....	39

2.3.4.4 Redresseur à principe de la MLI.....	40
2.4 SOLUTIONS NON CONVENTIONNELLES.....	40
2.4.1 Système Improved Power Quality AC-DC Converter IPQC.....	40
2.4.2 Système Power Line Communication PLC.....	41
2.4.3 Filtrage actif à l'aide d'une machine synchrone à double alimentation .....	42
2.5 CONCLUSIONS.....	42
CHPITRE 03.....	45
3- Généralités sur les éoliennes.	
3.1-INTRODUCTION .....	45
3.2-HISTORIQUE.....	45
3.3-objectifs.....	46
3.4- DEFINITION.....	46
3.5- LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES.....	46
3.5.1- Les éoliennes à axe vertical.....	46
3.5.2- Les éoliennes à axe horizontal.....	48
3.6-PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL.....	49
3.7-APPLICATIONS DES EOLIENNES.....	50
3.8-POTENTIEL ENERGETIQUE.....	51
3-8.1-Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique.....	51
3.8.2-Le coefficient de puissance.....	51
3.8.3-Le coefficient de vitesse réduite.....	52
3.8.4- Limite de Betz.....	52
3.8.5- Classement des types d'éoliennes en fonction du coefficient de puissance.....	53



3.9-GENERATEURS.....	54
3.9.1-Générateur Asynchrone (GAS).....	54
3.9.1.1-Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE).....	55
3.9.1.2.Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné (GARB).....	55
3.9.1.3.Génératrice Asynchrone à double Alimentation (GADA)...	55
3.9.2 .Générateur Synchrone (GS) .....	56
3.9.2.1.Générateur Synchrone à Rotor Bobiné (GSRB).....	57
3.9.2.2.Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP).....	57
3.9.3.Autres Générateurs.....	57
3.10.MACHINE ASYNCHRONE ADOUBLEALIMENTATION.....	58
3.10.1. Principe de fonctionnement .....	58
3.10.2. Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.....	60
3.10.3.Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable.....	61
3. 11.CONCLUSION.....	63
4 - SIMULATION ET RESULTATS	
4.1-INTRODUCTION.....	65
4.2-METHODE D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES.....	65
4.2.1-Identification dans le Domaine Fréquentiel.....	66
4.2.2-Identification dans le Domaine Temporel.....	66
4.2.2.1- Théorie de la puissance instantanée (pq).....	66
4.3-Commandes des filtres actifs parallèles .....	69
4.4 -Stratégie de commande de l'onduleur du filtre active.....	69
4.4.1-Contrôle par MLI.....	69
4.4.2-Contrôle conventionnel par hystérésis.....	70
4.4.3-Contrôle par hystérésis modulée.....	71
4.5-SIMULATION ET RESULTATS.....	71

4.5.1-Description du système.....	71
4.5.2- Etude du système avant filtrage.....	72
4.5.3-Commentaire.....	75
4.5.4-Résultats après le filtrage.....	75
4.5.4.1-Résultats de simulation dans le cas du contrôle par MLI.....	75
4.5.4.2-Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis.....	76
4.5.4.3-Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis modulée.....	78
4.6-CONCLUSION.....	80

## INTRODUCTION GENERALE

Le réseau électrique est un assemblage de matériels ayant pour rôle d'acheminer l'électricité depuis la source (centrales) jusqu'aux utilisateurs dans les meilleures conditions économiques et techniques. L'énergie électrique, par sa facilité d'utilisation, de régulation et d'automatisation, est devenue indispensable à la vie quotidienne.

Ces dernières années, nous assistons à une augmentation sans cesse croissante de la demande de la puissance électrique afin de répondre aux exigences industrielles et quotidiennes. Cette augmentation est accompagnée par les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique et l'environnement dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables qui représentent une solution importante. Parmi les nouvelles sources d'énergie, on trouve l'énergie éolienne qui fait l'objet de ce travail [1].

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique), en particulier l'énergie éolienne qui représente une solution importante et pourrait mitiger beaucoup de problèmes grâce essentiellement à ses impacts insignifiants sur l'environnement, et le fait que cette énergie est renouvelable et pourrait contribuer au développement dans le monde. Ainsi, la production d'électricité par des sources d'énergies renouvelables offre une grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [2, 3]. Les éoliennes sont aussi équipées d'un système de commande basé sur les convertisseurs électroniques pour s'adapter aux conditions de vent. Le système éolien est contrôlé de manière à maximiser la puissance produite en recherchant en permanence le point de fonctionnement à maximum de puissance [4].

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à

l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire même la destruction totale de tous ces équipements [5].

L'insertion de plus en plus croissante des éoliennes a conduit les chercheurs en « Génie Electrique » à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type asynchrone dans un système éolien puis le filtrage parallèle à la présence de ce dernier. L'objectif principal de ce travail est de faire l'analyse et le filtrage d'un réseau électrique avec une production éolienne connectée à une charge non linéaire.

Dans le premier chapitre on a étudié les caractéristiques générales des perturbations électriques, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons les moyens de luttés et les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique existantes.

Dans le troisième chapitre nous avons parlé sur générateurs éolienne, leurs historique, leurs évolution, les types des turbines et les types des générateurs.

Le Quatrième chapitre est entamé par les techniques de commande utilisées dans le filtrage actif parallèle. Après, les résultats de simulation d'une source éolienne connectée à une charge non linéaire sont aussi présentés pour trois méthodes de commande.

# Chapitre 01

## **Étude de la pollution harmonique**

## **1.1 - Introduction et objectifs**

### **1.1.1 - Préambule**

Les convertisseurs électroniques et l'électronique de puissance ont donné naissance à de nombreuses applications nouvelles, offrant aux clients un confort, une flexibilité et une efficacité inégalables. Mais, leur prolifération au cours des 2 dernières décennies est devenue inquiétante et préoccupante et se trouve à l'origine de problèmes dont le nombre ne cesse de croître. Ces charges électroniques polluent, non seulement, le réseau de distribution de courant alternatif mais sont, apparemment, aussi très sensibles à la distorsion de la tension.

### **1.1.2 - Objectifs**

Les objectifs de ce chapitre sont :

- Étudier les caractéristiques générales des perturbations électriques.
- Détailler les origines, les conséquences matérielles et les limites tolérées imposées par les normes internationales.

## **1.2 - DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATIONS ELECTRIQUES [3]**

Les perturbations électriques ne sont considérées qu'à travers la gêne et le dysfonctionnement qu'elles peuvent causer à un système sensible. La notion des perturbations est, par conséquent, relative. Cependant, elles peuvent être, schématiquement, classées selon 2 catégories :

- Celles qui portent atteintes à la continuité de l'alimentation et qui se traduisent par des coupures.

Le problème à résoudre vis-à-vis de ces perturbations est celui de la fiabilité du réseau d'alimentation.

- Celles liées à la qualité de l'alimentation proprement dite. Ce sont les fluctuations de l'onde de tension caractérisée par la fréquence, l'amplitude, la pureté de la forme sinusoïdale de l'onde et la symétrie du système triphasé.

Parmi ces perturbations, on distingue plusieurs types dont certaines sont, brièvement, définies ou décrites dans ce qui suit.

### 1.2.1 - Creux de tension et coupures brèves [3]

Les creux de tension sont définis comme étant une diminution de 10% à 90% de l'amplitude de la tension nominale. Le temps imparti est de 10 à 20 [ $\mu$ s]. Ils sont compris entre le 2<sup>ème</sup> et le 3<sup>ème</sup> coup de tension : le premier étant son effondrement, le second sa remontée. L'effondrement de la tension est proportionnel à l'élévation du courant. Inversement, la remontée de la tension est proportionnelle à l'effondrement du courant. Cependant, l'importance de ces à-coups est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de l'endroit où s'est produite la perturbation (Fig. 1.1).

Les coupures brèves sont définies comme étant des disparitions de la tension d'alimentation pendant un temps qui n'excède pas une minute. Par convention de langage, une coupure brève est un creux de tension de 100% de l'amplitude de la tension (Fig. 1.2).

Les creux de tensions et coupures brèves sont, principalement, produits par les courts-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'organes de protection éliminant ces défauts. Ils sont, également, la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau (démarrage des moteurs, branchement de charges importantes, ...ect) .

### 1.2.2 - Fluctuations de tension et flicker [3]

Une fluctuation de tension est décrite comme une variation de l'enveloppe de la tension. L'amplitude de celle-ci doit se situer dans une bande de 10% de sa valeur nominale. Ce type de fluctuation est à distinguer des variations lentes de tension dues à la variation progressive de la consommation dans les réseaux. Les principales sources de fluctuations rapides sont les charges industrielles dont le fonctionnement aléatoire ou intempestif occasionne de brusques variations de puissances telles que les machines à souder et les fours à arc. Ces derniers produisent des variations erratiques permanentes de tension. Ces fluctuations sont responsables du phénomène de "flicker" (Fig. 1.3) [4].

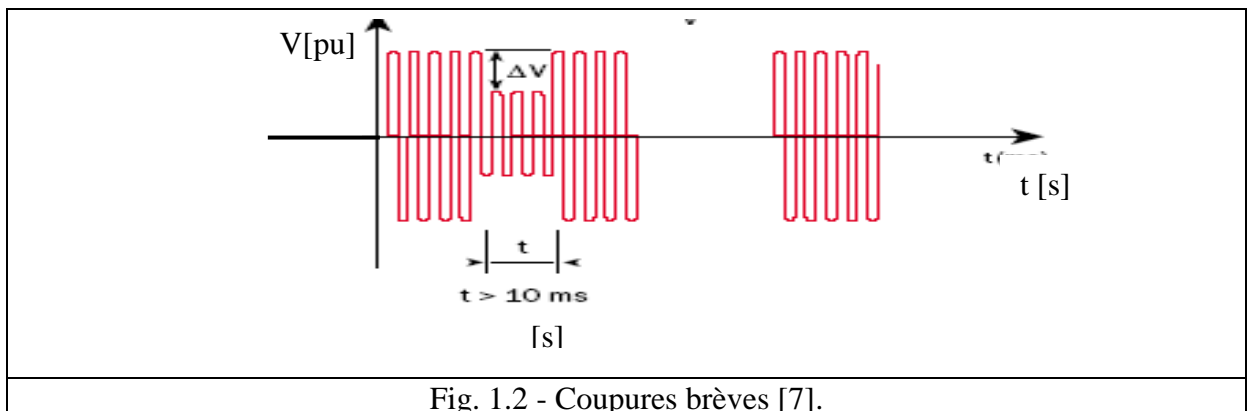
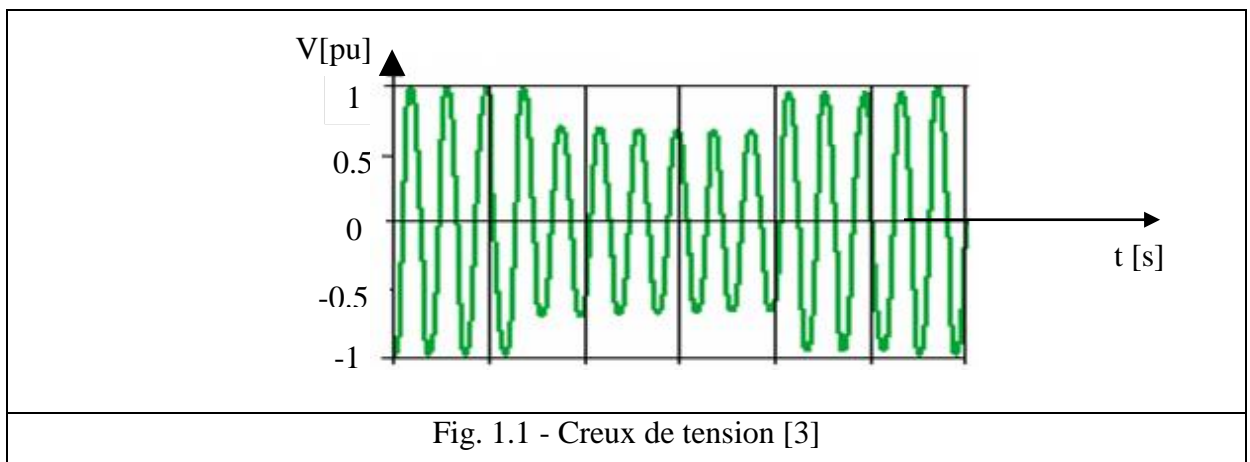
Le flicker est le phénomène de papillotement des sources lumineuses, dû aux fluctuations de tension de l'alimentation électrique (Fig. 1.4). Il peut gêner les personnes dans les ateliers, les bureaux, les locaux d'habitation en amenant une fatigue visuelle et nerveuse. Il peut concerner, simultanément, un grand nombre de personnes (perturbation du réseau de distribution publique HTA et HTB). Aujourd'hui, les limites des fluctuations de tension périodiques qui provoquent l'effet du flicker sont connues. Les générateurs du flicker sont

nombreux et peuvent être très puissants (fours à arc en aciérie). Il est très important de les connaître, sachant que des variations de tension de moins de 1 % peuvent apporter une gêne. Leur identification est une nécessité car le flicker est souvent difficile à supprimer sur un réseau existant. Il est donc important d'analyser les risques potentiels du flicker dès la pré étude d'une installation et de prévoir, dès la conception du réseau, les solutions permettant de s'en affranchir. Ces solutions peuvent être:

- Modification du type d'éclairage.
- Modification de la structure du réseau.
- Adaptation du fonctionnement du perturbateur.
- Installation d'un équipement de réduction du flicker [5].

### 1.2.3 - Déséquilibre de tension

Le phénomène de déséquilibre est défini comme étant une différence d'au moins une des 3 tensions du réseau électrique soit en amplitude soit en déphasage. Il résulte, essentiellement, de la présence de fortes charges monophasées raccordées non uniformément sur le réseau triphasé (Fig.1.5).





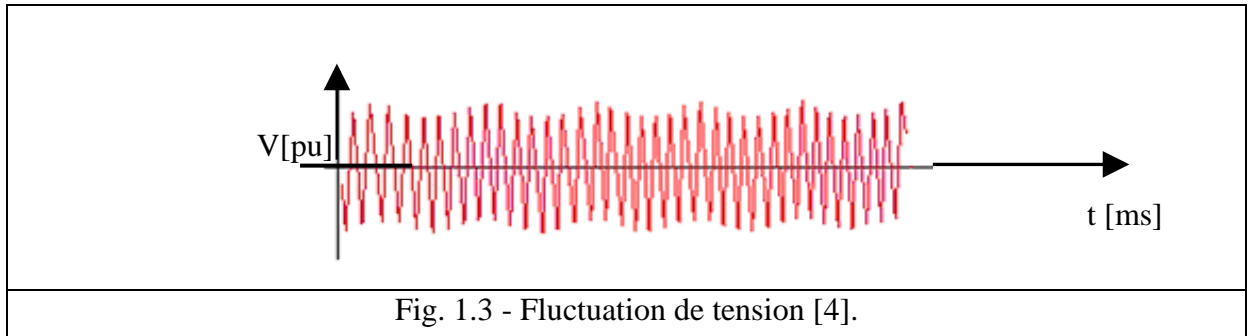


Fig. 1.3 - Fluctuation de tension [4].

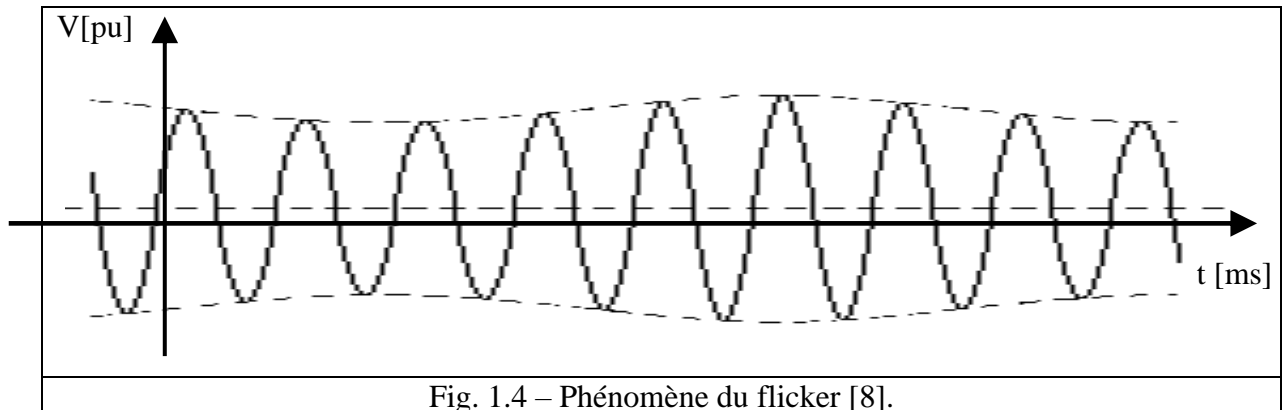


Fig. 1.4 – Phénomène du flicker [8].

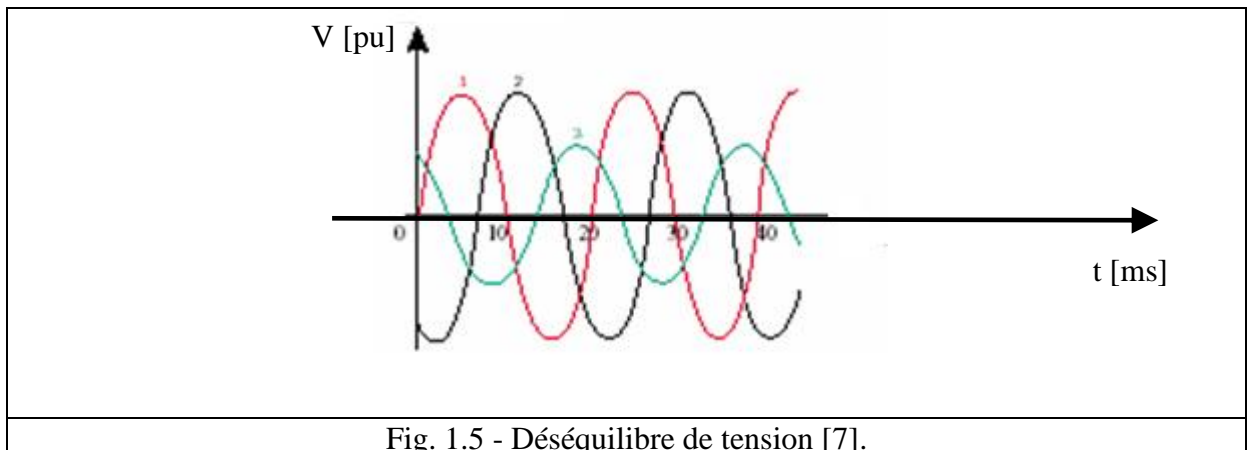


Fig. 1.5 - Déséquilibre de tension [7].

### 1.2.4 - Surtensions transitoires [3]

Les phénomènes de surtensions transitoires (Fig. 1.6) sont, également, des phénomènes brefs dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale pendant une durée inférieure à une seconde. Leurs origines sont, essentiellement, liées :

- A la foudre.
- Aux différentes manœuvres opérées sur le réseau ( coupure de courant de court-circuit, enclenchement de ligne à vide ...).

- Aux fonctionnements anormaux du réseau (variation brusque de la charge résonances..).

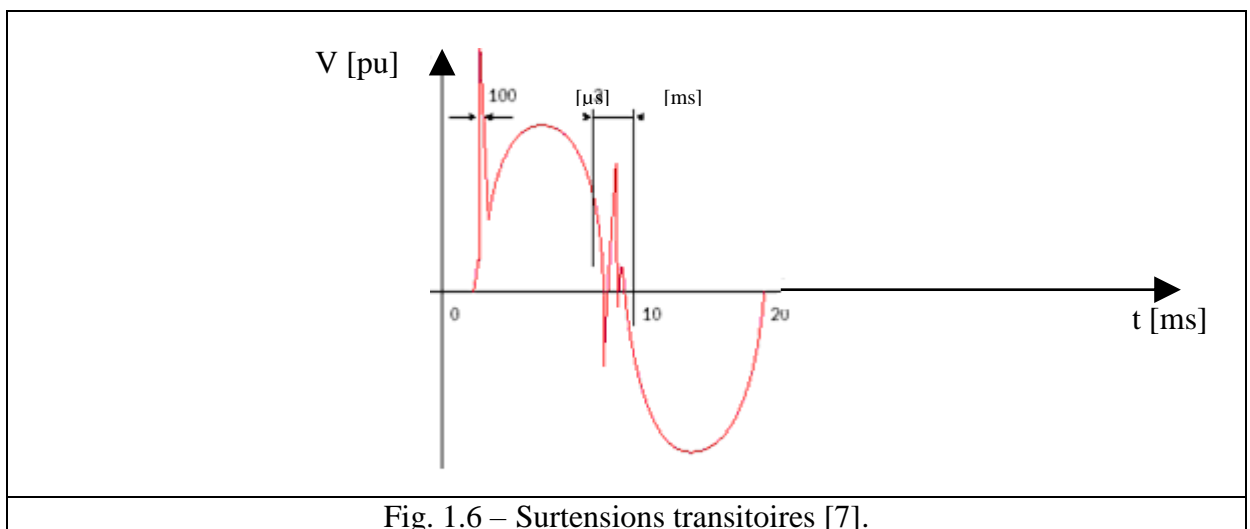
### 1.2.5 - Harmoniques et inter-harmoniques

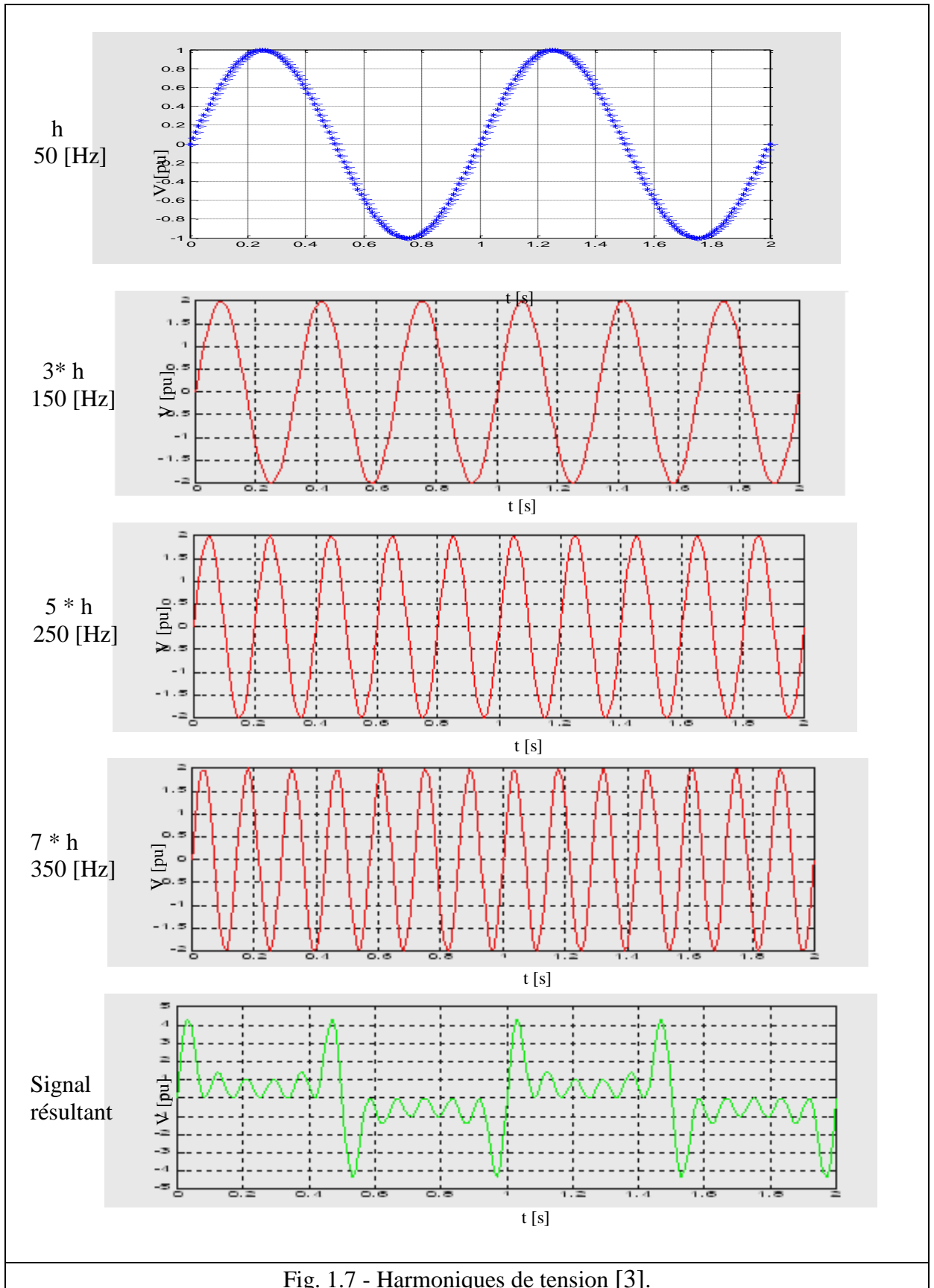
Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du réseau. En général, nous différencions 2 types d'harmoniques :

- Les harmoniques de courant dus à la présence de charges non linéaires telles que les appareils d'éclairage fluorescents, les fours à arc, les redresseurs, les variateurs électroniques de vitesse.... , qui peuvent être identifiés à une source de courant harmonique.

- Les harmoniques de tension issus du réseau lui-même dus, en général, à des petites imperfections de construction des bobinages des différent matériels du réseau eux-mêmes, tels que les machines tournantes et les transformateurs qui, pratiquement, ne délivrent pas une tension purement sinusoïdale. Ces harmoniques peuvent être identifiés à une source de tension harmonique (Fig. 1.7).

La tension du réseau peut contenir des composantes fréquentielles qui ne sont pas des multiples entiers du fondamental. Ce type de composantes sont, communément, appelées inter-harmoniques. Elles peuvent apparaître soit sous forme de fréquence discrète, soit sous forme de spectres à large bande. Leurs sources principales sont les cycloconvertisseurs, les convertisseurs de fréquence, les machines synchrones, les machines à souder et les fours à arc [4].





## 1.3 - PERTURBATIONS HARMONIQUES [8]

### 1.3.1 - Nature physique du phénomène

La plupart des appareils électriques raccordés à un réseau alternatif nécessitent, pour leur bon fonctionnement, une alimentation sinusoïdale 50 [Hz] dans la majorité des pays au monde et 60 [Hz] dans quelques pays tels que les USA, le Japon,.... En Algérie, par exemple, les installations industrielles consommatrices absorbent, théoriquement, un courant sinusoïdal à 50 [Hz]. Les charges dites passives, comme les résistances de chauffage ou les condensateurs absorbent, elles-aussi, un courant sinusoïdal à 50 [Hz]. Par contre, certains appareils absorbent un courant périodique, mais non sinusoïdal. Le signal, ainsi obtenu, sera déformé et sera caractérisé par la superposition d'un certain nombre, juxtaposé, d'onde sinusoïdale de fréquence  $f_h$  dite fréquence multiple de la fréquence de l'harmonique fondamentale  $f$  reliées, entre-elles, par :

$$f_h = h f = 50 h \quad \text{Avec } h \text{ et le rang harmonique d'ordre } 1,2,3\dots \quad (1.1)$$

Ils produisent sur le réseau qui les alimente une déformation de la tension, qui n'est alors plus sinusoïdale. On dit qu'ils sont non linéaires et qu'ils émettent des courants harmoniques vers le réseau. La présence d'appareils non linéaires sur un réseau électrique peut entraîner des dysfonctionnements des autres appareils raccordés à proximités.

Ces signaux de tension et/ou de courant, ainsi déformés, peuvent être traités et analysés par la fameuse technique des séries de Fourier ou par l'analyse spectrale de Fourier. Elle consiste à décomposer un signal périodique de forme quelconque en une somme de signaux sinusoïdaux dont chacun est dit harmonique de fréquence  $f_h$ , définie par l'équation (1.1). Le problème des harmoniques se traite en examinant le réseau électrique soumis de façon indépendante, à chacune de ces fréquences harmoniques. On octroie à cette technique le principe de superposition, malgré la non linéarité des sources provoquant les déformations dites harmoniques

### 1.3.2 - Définitions et aspects théoriques des phénomènes [8]

#### 1.3.2.1 - Harmoniques d'un signal périodique

La forme des ondes de courant et de tension relevée sur les réseaux industriels et tertiaires s'éloigne assez de la circulation sur le réseau de courants non sinusoïdaux. La question pratique est de savoir quel impact a, l'ensemble de tous les courants non sinusoïdaux, sur la tension. On sait répondre en partie à cette question : comme tous les éléments du réseau ont un comportement linéaire, l'effet sur la tension de l'ensemble des courants est la superposition de l'effet qu'aurait chaque courant individuellement. Reste un problème de taille : quel effet, un courant donné, a-t-il sur la tension ? On sait répondre quand le courant est sinusoïdal, avec les techniques qui utilisent les notions d'impédance complexe ou de diagramme de Fresnel. Mais, cela paraît bien plus compliqué car les formes de courant peuvent être très différentes de la sinusoïde pure. Pourtant, la solution consiste à utiliser la décomposition en série de Fourier qui s'appuie sur le fait que tout signal périodique peut être représenté par une somme d'ondes sinusoïdales : une onde à la fréquence fondamentale de 50 [Hz] et des ondes de fréquence multiple de la fréquence fondamentale (les harmoniques). Alors, quel que soit le courant injecté, grâce à la linéarité du comportement du réseau, on est amené à examiner l'effet d'un courant sinusoïdal injecté dans un réseau (courant et tension dans chaque élément). L'effet global s'obtiendra en superposant chaque effet élémentaire. Cette décomposition, dite harmonique, est un artifice mathématique très commode. Ceux qui l'utilisent ont été amenés à parler des harmoniques comme d'un phénomène physique à part entière. Dans la réalité, on observe seulement des signaux non sinusoïdaux.

Si l'on n'avait pas connu cette méthode, on aurait eu à résoudre, dans le domaine temporel, des équations du type :

$$v(t) = R(t) + L \frac{di(t)}{dt} \tag{1.2}$$

Ce qui est faisable, mais plus laborieux. Grâce à la décomposition en série de Fourier, ou décomposition harmonique, on traite des équations algébriques du type :

$$V = RI + jL\omega I = ZI \quad \text{Avec} \quad Z = R + j\omega L \tag{1.3}$$

Où le paramètre temps n'apparaît pas de façon explicite. Il s'y substitue par le terme :

$$\omega = 2\pi f \tag{1.4}$$

D'où la dénomination de domaine fréquentiel. L'intérêt de la décomposition harmonique est de faciliter les calculs dans l'analyse et la synthèse des réseaux. Ainsi, on peut dissocier

l'étude fondamentale de celle relative aux fréquences harmoniques. On traite le problème global en autant de problèmes linéaires qu'il y a de rangs harmoniques.

$$U_1 = Z_1 I_1 \tag{1.5}$$

$$U_h = Z_h I_h \tag{1.6}$$

Il faut noter que  $U_h$ ,  $Z_h$  et  $I_h$  sont des grandeurs vectorielles qu'on peut décrire par leur amplitude et leur phase. Grâce à cette décomposition, l'analyse des impédances rencontrées par les courants harmoniques peut être représentée sous la forme amplitude ou phase en fonction de la fréquence. La connaissance des vecteurs de courant et des impédances du réseau permet de déterminer les vecteurs de tension harmonique en chaque point du réseau.

### 1.3.2.2 - Décomposition en série de Fourier [8]

Le signal  $s(t)$  peut représenter un courant ou une tension. Il est périodique de période  $T$ , de fréquence  $f = 1/T$  et de pulsation  $\omega$ . Ce signal  $s(t)$  peut se décomposer de la façon suivante :

$$s(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(\omega h t) + b_h \sin(\omega h t)] \tag{1.7}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad \text{Avec} \quad h = 0 \tag{1.8}$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(\omega h t) dt \quad \text{Avec} \quad h \geq 1 \tag{1.9}$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(\omega h t) dt \quad \text{Avec} \quad h \geq 1 \tag{1.10}$$

Sous forme compacte, l'équation (2.8) peut s'écrire :

$$s(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(\omega h t + \theta_h) \quad \text{Avec} \quad C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad \& \quad \theta_h = \arctan \frac{a_h}{b_h} \tag{1.11}$$

Le terme  $[a_h \cos(\omega h t) + b_h \sin(\omega h t)]$  ou  $C_h \sin(\omega h t + \theta_h)$  est l'harmonique de rang  $h$ . La

grandeur  $C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$  est l'amplitude de l'harmonique. Il faut noter qu'on utilise très

souvent le terme amplitude pour désigner la valeur efficace harmonique donnée par :

$$C_{eff\ h} = \frac{C_h}{\sqrt{2}} \tag{1.12}$$

$C_1$  est l'amplitude fondamentale. La grandeur  $\theta_h$  est la phase de l'harmonique de rang  $h$  et  $a_0$  est la composante continue du signal. Jusqu'à présent, les appareils générants des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 [Hz]. C'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend, généralement, de 100 à 2500 [Hz] correspondant aux rangs  $h$  compris entre 2 et 50 ( $2 \leq h \leq 50$ ).

### 1.3.2.3 - Analyse d'un signal

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal est l'évaluation de sa valeur efficace. La valeur efficace d'un signal  $s(t)$  périodique de période  $T$  est donnée par :

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt} \quad (1.13)$$

La valeur efficace d'un signal déformé tient compte de la présence de toutes les composantes harmoniques, interharmoniques et de la composante continue. Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est, donc, différente de la valeur efficace du signal fondamental. Il est, alors, possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale avec celle du signal.

### 1.3.2.4 - Pourcentage d'harmoniques [8]

C'est le pourcentage entre la valeur efficace harmonique et celle du fondamental.

$$\tau_h [\%] = 100 \cdot \frac{S_{eff h}}{S_{eff}} \quad (1.14)$$

## 1.3.3 - Harmoniques de courant et de tension [8]

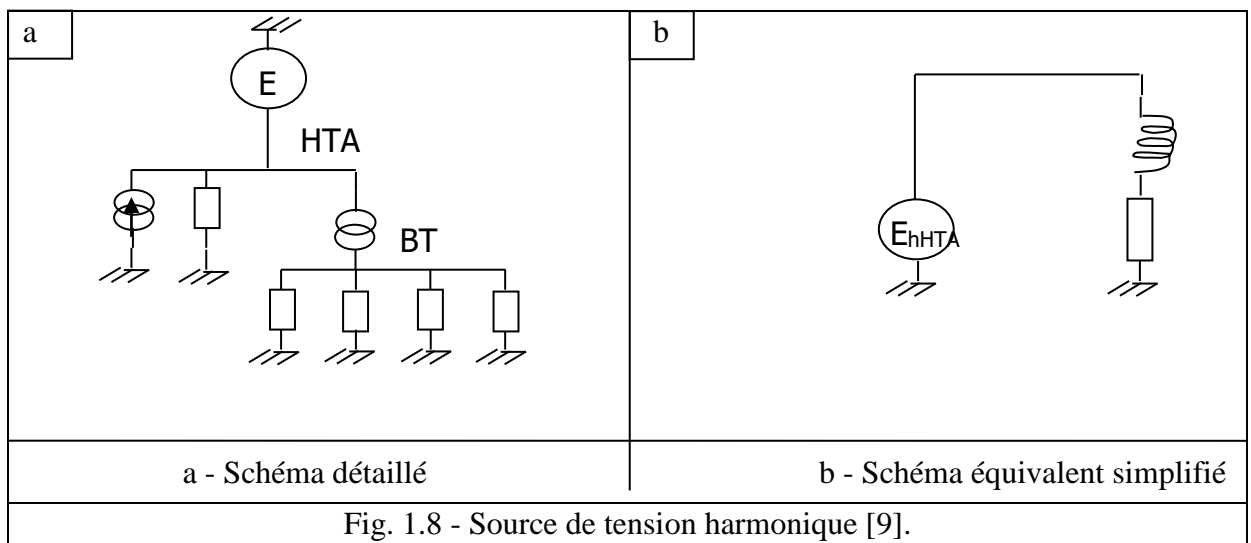
### 1.3.3.1 - Courant harmonique

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents dans les réseaux électriques proviennent de la profilération de charges non linéaires. On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50 [Hz], elle n'absorbe pas un courant purement sinusoïdal à 50 [Hz]. Ces charges se comportent, approximativement, comme des sources de courants harmoniques, c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau. Une charge passive est une charge ne comportant pas de systèmes de commutation rapide, autorisant un découpage de l'onde fondamentale de 50 [Hz],

contrairement aux charges actives. Les charges actives utilisent toujours des commutateurs électroniques de puissance.

### 1.3.3.2 - Tension harmonique

On peut parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire. En effet, le raccordement d'un récepteur de faible puissance ne modifie presque pas le niveau préexistant (Fig. 1.8).



### 1.3.3.3 - Loi d'Ohm généralisée et impédance harmonique

L'impédance présentée dépend de la fréquence du réseau considéré. On peut définir en tout point d'un réseau une impédance harmonique  $Z_h$ , qui dépend du rang harmonique  $h$  considéré. Elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point. Les courants harmoniques émis par une charge perturbatrice se partagent entre les différentes lignes. Le produit des harmoniques de courant provenant des charges non linéaires par l'impédance harmonique du réseau, en un point donné du réseau, crée des harmoniques de tension déterminés par la loi d'Ohm généralisée (Fig. 1.9) :

$$V_h = Z_h I_h \tag{1.15}$$

### 1.3.4 - Distorsion harmonique [8]

Plusieurs expressions peuvent être utilisées pour quantifier la déformation d'un signal.

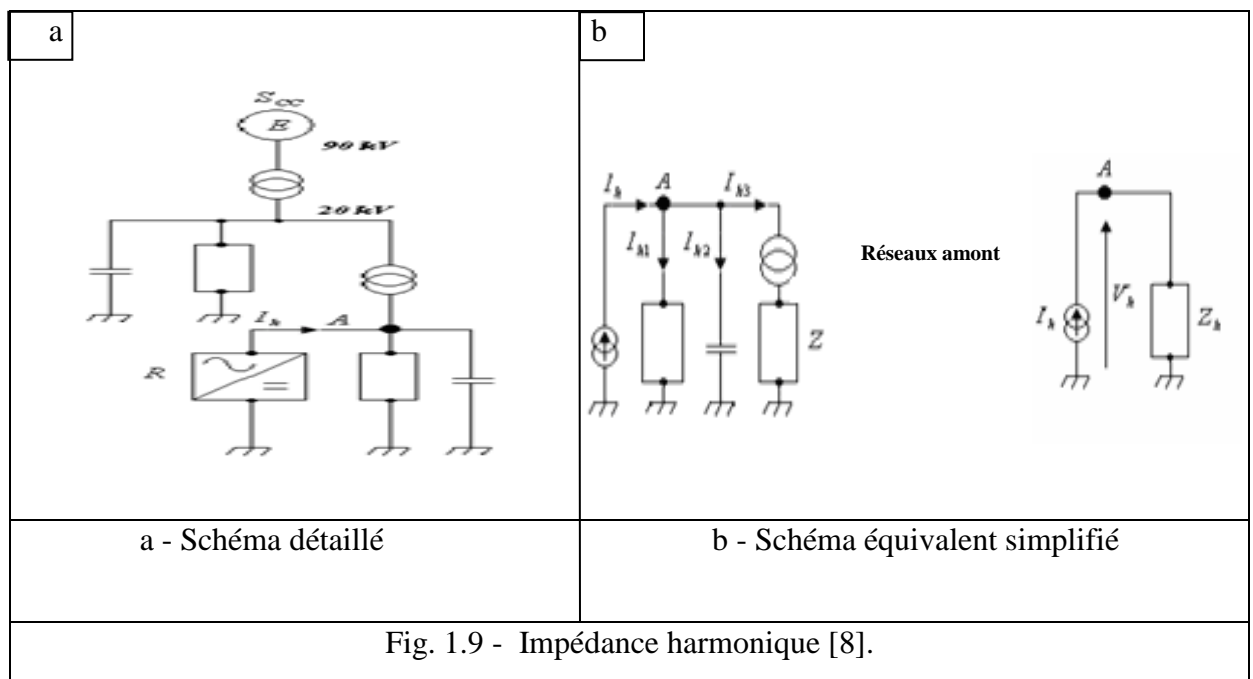


### 1.3.4.1 - Taux harmonique de rang h : THH

On caractérise la déformation par le taux harmonique  $S_h(\%)$  de rang h, défini par :

$$THH = S_h(\%) = \frac{C_h}{C_1} 100 = 100 \frac{S_{eff,h}}{S_{eff}} = \tau_h [\%] \quad (1.16)$$

$C_h$  représente la composante harmonique de rang  $h$  et  $C_1$  représente la composante fondamentale.



### 1.3.4.2 - Taux global de distorsion harmonique : TDH

Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques. Il est donné par le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle de la valeur efficace du fondamental.

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2}}{C_1} \quad (1.17)$$

Selon la sensibilité des appareils, des rangs plus ou moins élevés, sont pris en compte. La tendance actuelle dans les normes est de considérer les harmoniques jusqu'au rang  $h = 50$ . Précisons que, dans les normes CEI, on trouve une autre définition du *TDH*.

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} C_h^2}}{S_{eff}} \quad (1.18)$$

Bien qu'elle donne une mesure analogique des signaux plus aisée, cette notion est de moins en moins utilisée. En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 [Hz]. Ceci correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation.

Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieure à 2500 [Hz]. C'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend, généralement, de 100 à 2500 [Hz], correspondant aux rangs  $2 \leq h \leq 50$ .

### 1.3.4.3 - Taux de distorsions pondérées : TDP

Afin de tenir compte de la spécificité de certains types de matériels tels que les condensateurs, les inductances ou les moteurs, on peut utiliser les *TDP* en tension. Ils sont définis en fonction de la tension réduite  $u_h = \frac{U_h}{U_1}$  [pu].

- Pour les condensateurs :

$$TDP_{X_c} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} h^2 u_h^2} \quad (1.19)$$

- Pour les inductances :

$$TDP_{X_L} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{u_h^2}{h^2}} \quad (1.20)$$

- Pour les moteurs :

$$TDP_M = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{u_h^2}{h^2}} \quad (1.21)$$

### 1.3.5 - Facteur de puissance [4]

Pour un système monophasé comportant une source de tension, une ligne et une charge, les expressions instantanées du courant simple de charge  $i(t)$  et de sa tension simple  $v_s(t)$  peuvent s'écrire sous la forme :

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad \text{Avec } \alpha_h : \text{déphasage du courant harmonique de rang } h. \quad (1.22)$$

$$v_s(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_{sh} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad \text{Avec } \beta_h : \text{déphasage de la tension harmonique de rang } h. \quad (1.23)$$

Les valeurs efficaces de la tension et du courant sont :

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad \text{Avec } V_h : \text{Valeur efficace de la tension harmonique d'ordre } h. \quad (1.24)$$

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad \text{Avec } I_h : \text{Valeur efficace du courant harmonique d'ordre } h \quad (1.25)$$

Dans le cas d'un réseau triphasé équilibré, la puissance apparente est définie par :

$$S = 3V_{eff} I_{eff} = 3\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1.26)$$

La puissance active est définie par :

$$P = 3\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad \text{Avec} \quad \varphi_h = \beta_h - \alpha_h \quad (1.27)$$

Le facteur de puissance  $F_P$  peut être exprimée par :

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (1.28)$$

Dans le cas où la tension du réseau est sinusoïdale, le facteur de puissance devient :

$$F_p = \cos \varphi_1 \quad (1.29)$$

La puissance réactive d'un S3φE, résultant du déphasage entre les grandeurs fondamentales du courant et de la tension est alors :

$$Q = 3V_1 I_1 \sin \varphi_1 \tag{1.30}$$

Pour tenir compte de la participation des harmoniques dans la puissance apparente, nous utilisons la notion de la puissance déformante D :

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \tag{1.31}$$

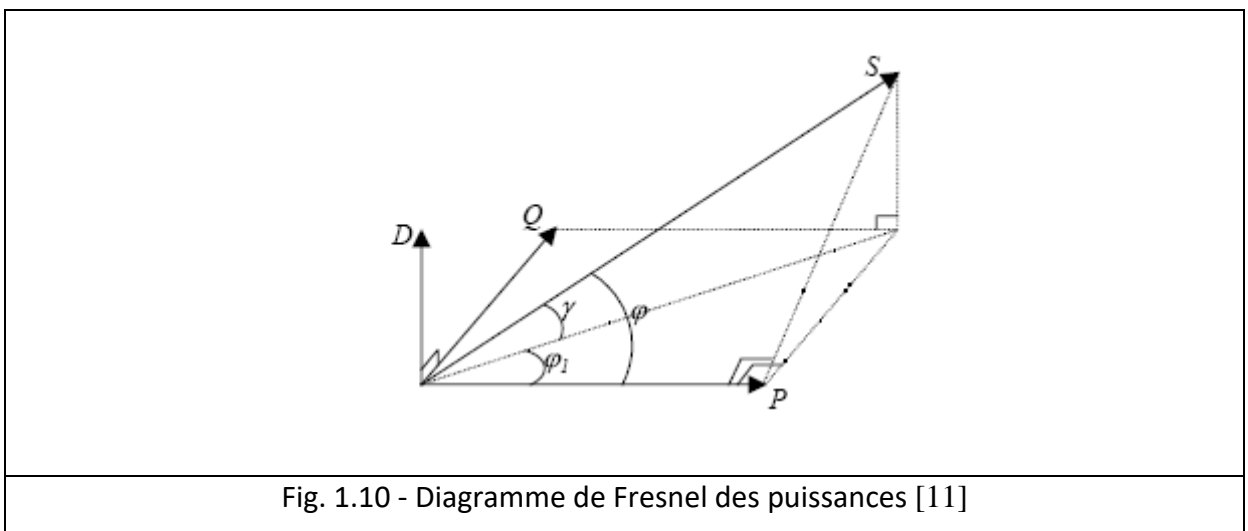
La puissance apparente, pour un S3φE pollué par les harmoniques, peut s'écrire :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{1.32}$$

Le facteur de puissance  $F_p$ , dans ce cas, sera donc :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \tag{1.33}$$

Le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques. La figure 1.10 montre le diagramme de Fresnel tridimensionnel, mettant en relief l'argument du facteur de puissance pour les S3φE pollués.



### 1.3.6 - Harmoniques dans un système triphasé [8]

#### 1.3.6.1 - Système triphasé équilibré

Si on alimente un système de charge triphasé équilibré par un système de tensions triphasé équilibré, il s'écoule des courants équilibrés  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  (respectivement sur les phases a, b & c) tel que :

$$I_b(t) = I_a(t - \frac{T}{3}) \tag{1.34}$$

$$I_c(t) = I_a(t - \frac{2T}{3}) \tag{1.35}$$

Les expressions des signaux harmoniques de rang h, en négligeant leurs interactions mutuelles, sont :

$$s_{h,a}(t) = S_h \sin(hwt) \tag{1.36}$$

$$s_{h,b}(t) = S_h \sin(hwt - \frac{2\pi h}{3}) \tag{1.37}$$

$$s_{h,c}(t) = S_h \sin(hwt + \frac{2\pi h}{3}) \tag{1.38}$$

Si le réseau comporte un conducteur de neutre, les courants harmoniques d'ordre 3 ou multiples de 3 dus aux 3 phases s'y ajoutent car ils sont synchrones.

Supposons 3 courants  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  &  $i_c(t)$  équilibrés et déphasés d'un tiers de période comme suit :

$$i_a(t) = I \cos(wt) \tag{1.39}$$

$$i_b(t) = I \cos(w(t + \frac{T}{3})) \tag{1.40} \quad \text{Avec} \quad T = \frac{2\pi}{w}$$

$$i_c(t) = I \cos(w(t + \frac{2T}{3})) \tag{1.41}$$

Les harmoniques d'ordre 3 de ces courants sont obtenus en remplaçant  $w$  par  $3w$  comme suit :

$$i_{a3}(t) = I_3 \cos(3wt) \tag{1.42}$$

$$i_{b3}(t) = I_3 \cos(3wt + wT) = I_3 \cos(3wt + 2\pi) = I_3 \cos(3wt) \tag{1.43}$$

$$i_{c3}(t) = I_3 \cos(3wt + 2wT) = I_3 \cos(3wt + 4\pi) = I_3 \cos(3wt) \tag{1.44}$$

On a, alors :

$$i_{a3}(t) + i_{b3}(t) + i_{c3}(t) = 3I_3 \cos(3wt) \tag{1.45}$$

La figure 1.11 montre la circulation des courants harmoniques 3 et multiples de 3 dans le conducteur du neutre.

### 1.3.6.2- Système triphasé déséquilibré

Pour l'étude des systèmes déséquilibrés, il est nécessaire de décomposer les signaux étudiés en système direct, inverse et homopolaire. Pour effectuer cette décomposition, on généralise et adapte la méthode de Fortescue, développée en 1918, pour la composante fondamentale de 50 [Hz] et pour les fréquences harmoniques [8].

TAB. 1.1- Harmoniques dans un système triphasé équilibré [8].		
Rang harmonique h	Signal	Types d'harmoniques
$h = 3k+1$ k : nombre entier	$s_h \sin(hwt)$ $s_h \sin(hwt - \frac{2\pi h}{3})$ $s_h \sin(hwt - \frac{4\pi h}{3})$	Les harmoniques forment dans ce cas un système triphasé direct.
$h = 3k-1$	$s_h \sin(hwt)$ $s_h \sin(hwt - \frac{4\pi h}{3})$ $s_h \sin(hwt - \frac{2\pi h}{3})$	Les harmoniques forment dans ce cas un système triphasé inverse.
$h = 3k$	$s_h \sin(hwt)$ $s_h \sin(hwt)$ $s_h \sin(hwt)$	Les harmoniques forment dans ce cas un système triphasé homopolaire.

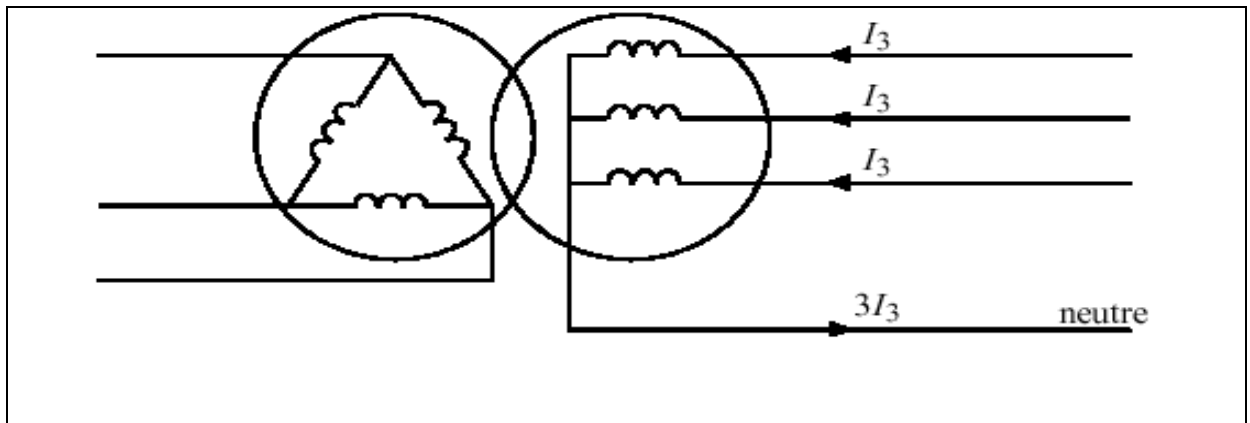


Fig. 1.11 - Circulation des courants harmoniques d'ordre 3 et multiples de 3 dans le conducteur du neutre [6].

### 1.3.7 - Interharmoniques

Les interharmoniques sont des signaux de fréquence non multiple à la fréquence fondamentale. Certains sont émis par les charges non linéaires. D'autres sont injectés, intentionnellement, par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais et piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels.

#### 1.3.7.1 - Charges non linéaires produisant les interharmoniques [3]

La grande majorité des tensions et courants interharmoniques sur le réseau est généré par des convertisseurs de fréquence statiques. C'est le cas des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones qui renvoient vers le réseau des fréquences non multiples de la fréquence de sortie.

Les fours à arc sont, également, de fortes sources de courants interharmoniques. De simples machines tournantes peuvent aussi générer des courants interharmoniques de basses fréquences en présence d'une charge fluctuante. Mais, par rapport aux perturbations générées par des convertisseurs, leur amplitude est peu importante. Les fours à arc utilisés en sidérurgie peuvent être à courant alternatif ou à courant continu.

##### a – Four à arc à courant alternatif [7]

L'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage... (Fig. 1.12) [7].

**b - Four à arc à courant continu**

L'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur (Fig. 1.13). L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en :

- Un spectre semblable à celui d'un redresseur.
- Un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif [7].

**1.3.7.2 - Signaux de télécommande de 175 [Hz] sur les réseaux de distribution [9]**

Les compagnies de distribution d'électricité injectent des signaux de télécommande à des fréquences interharmoniques. Les émetteurs des signaux de télécommande sont placés au secondaire des transformateurs HTB/HTA, pour diffuser ce signal sur l'ensemble du réseau HTA et BT. Il existe des émetteurs de tension branchés en parallèle. Les relais, placés chez les utilisateurs, sont sensibles au taux de ce signal à 175 [Hz] :

$$\tau_{175[Hz]} = \frac{V_{175[Hz]}}{V_{50[Hz]}} \tag{1.46}$$

Les relais sont conçus pour fonctionner si le taux du signal reçu est supérieur à 0.9 [%]. Ils ne fonctionnent pas si ce taux est inférieur à 0.6 [%]. La propagation des signaux de télécommande sur les réseaux peut être perturbée, par exemple, par la présence de selfs antiharmoniques.

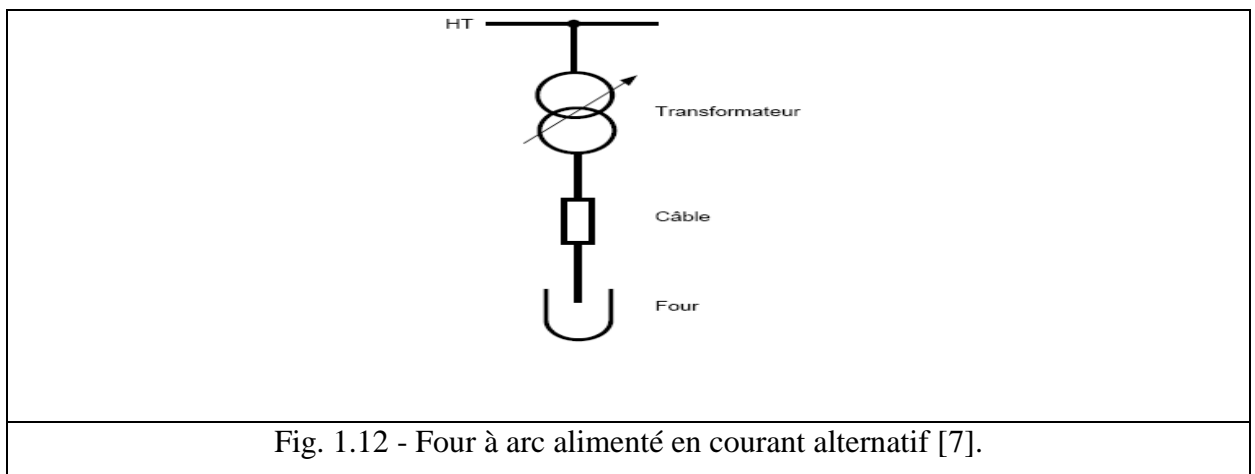
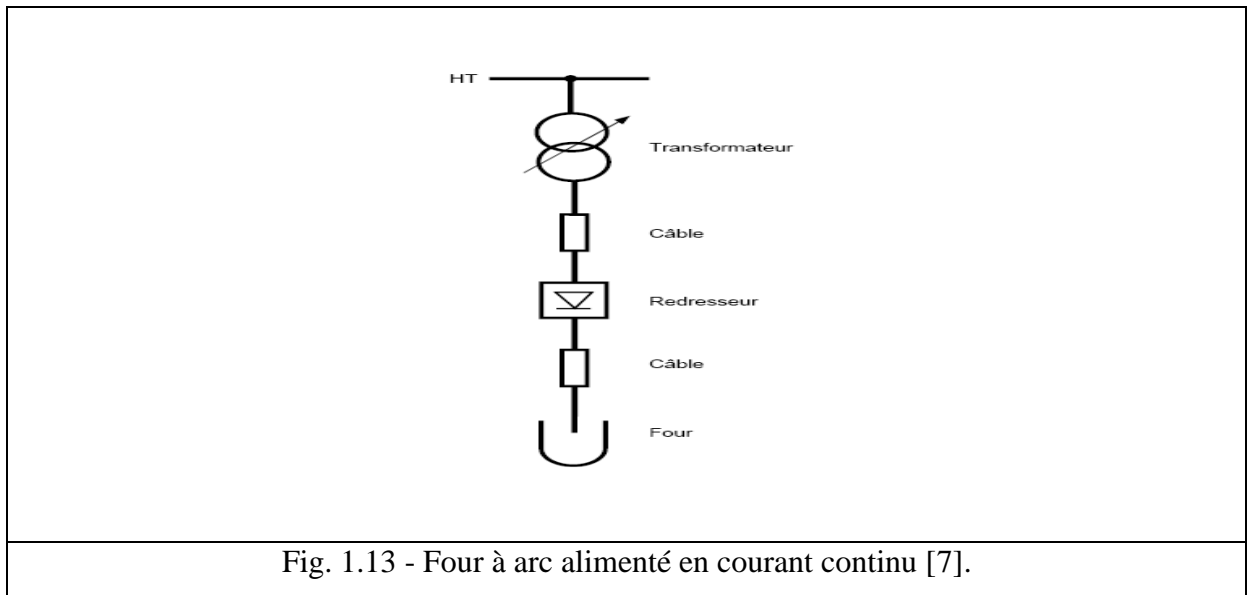


Fig. 1.12 - Four à arc alimenté en courant alternatif [7].





### 1.3.8 - ORIGINE DES PERTURBATIONS HARMONIQUES [4]

#### 1.3.8.1 - Appareils de production, de transport & de distribution

Cette catégorie concerne les appareils utilisés par les distributeurs d'énergie électrique. Parmi eux, on peut citer les alternateurs, les transformateurs et les convertisseurs de fréquence. La distorsion de la tension due aux matériels du réseau possède un taux, généralement, faible. Les imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs) des bobinages des machines tournantes, des alternateurs et des transformateurs, sont à l'origine de la pollution harmonique de la tension du réseau. Par conséquent, la machine synchrone produit les harmoniques au réseau en vue de la distribution de sa force électromotrice représentée par l'équation suivante :

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2}IN}{\pi} \sin(\omega t) \sum_{h=1}^{\infty} \sin h \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \quad (1.47)$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $I$  représente le courant parcourant les enroulements de la machine et  $N$  représente le nombre de conducteurs par fente [10].

#### 1.3.8.2 - Secteur industriel

Les convertisseurs d'électronique de puissance (redresseurs, gradateurs), les fours à arc, les fours à induction et les variateurs de vitesse constituent les principales causes de la distorsion harmonique dans le milieu industriel. Ils sont la cause majeure de la détérioration de la qualité du réseau. Les convertisseurs d'énergie fonctionnant en commutation absorbent

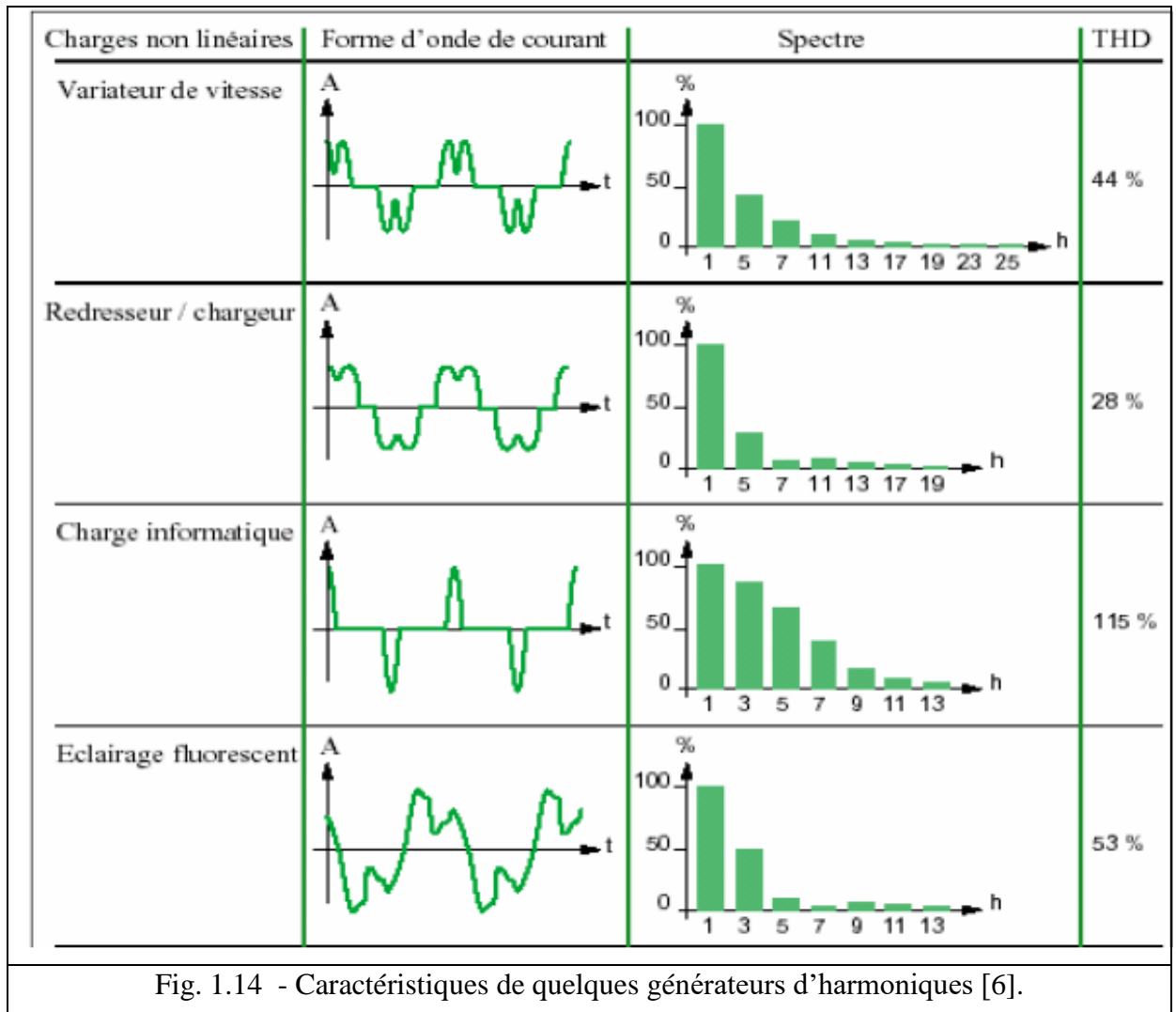
des courants riches en harmoniques. La circulation de ces courants à travers l'impédance de court-circuit dégrade la forme d'onde du réseau au point de raccordement de l'installation. L'importance de cette pollution est d'autant plus grande que la puissance de conversion est grande et que la puissance de court-circuit est faible.

### **1.3.8.3 - Secteur tertiaire**

Avec le développement de l'informatique, de la climatisation et des éclairages à base de tubes fluorescents, la clientèle tertiaire contribue de façon significative à la pollution harmonique. Les activités les plus concernées dans ce secteur sont les administrations, les centres commerciaux, les hôpitaux et les bureaux. Le montage électronique, le plus répandu dans ce secteur, est le redresseur monophasé à filtre capacitif utilisé comme étage d'entrée des dispositifs électriques tels que les alimentations de téléviseurs, des ordinateurs, des lampes à ballast et des variateurs de vitesse des machines électriques. Malheureusement, ce montage présente la particularité d'injecter des courants dont le TDH est très élevé ( $100 [\%] < \text{TDH} < 180 [\%]$ ). Ce taux varie selon l'application et dépend du dimensionnement de la charge du côté continu. Le gradateur monophasé tient, également, une place prépondérante en tant que charge non linéaire. Il est aussi utilisé, principalement, pour la commande de l'intensité des lampes, la commande de certains fours de cuisson et la régulation de puissance.

### **1.3.8.4 - Secteur domestique**

Le secteur résidentiel contribue pour une part importante à la pollution harmonique observée sur les réseaux. Les principaux équipements électriques perturbateurs sont les appareils électroménagers, les téléviseurs, les variateurs de lumière et les lampes fluorescentes (Fig. 1.14)



### 1.3.9 - CONSÉQUENCES DES PERTURBATIONS HARMONIQUES [4] - [7]

Les harmoniques rencontrés sur les réseaux électriques (en tension ou en courant) ont un grand nombre d'effets néfastes sur le fonctionnement du réseau. La présence des courants harmoniques, qui peuvent déformer la tension, dus aux charges non linéaires sont capâbles de perturber le fonctionnement des autres dispositifs connectés au réseau. Les principales conséquences des effets nocifs engendrés à court terme sont rappelées dans ce qui suit.

#### 1.3.9.1 - Échauffement

Les courants harmoniques gênent des pertes supplémentaires et par conséquent des échauffements. Ces pertes Joule dans les équipements se décomposent en la somme des pertes issues du fondamental et de celles engendrées par les harmoniques :

$$P_{Joule} = RI^2 = RI_1^2 + R \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \quad (1.48)$$

### 1.3.9.2 - Interférences avec les réseaux de télécommunication

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de communication peut provoquer des interférences. Le courant circulant dans le réseau électrique engendre un champ magnétique qui induit un courant dans les conducteurs des réseaux de communication. L'importance des interférences dépend de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux.

### 1.3.9.3 - Excitation des résonances

Des équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des harmoniques. Ainsi, les harmoniques sont amplifiés et ils peuvent apparaître des surtensions ou des surintensités qui détériorent les câbles et font disjoncter les fusibles. La présence des harmoniques réduits, également, le rendement des moteurs et des transformateurs en augmentant les pertes d'énergie par hystérésis et par les courants de Foucault. De plus, ces effets nocifs instantanés (échauffement, surtension, surintensité,...) provoquent un vieillissement accéléré des appareils électriques.

### 1.3.9.4 - Mauvais fonctionnement pour les dispositifs électriques

En présence des harmoniques, les tensions (ou les courants) peuvent changer de signe plusieurs fois dans une demie-période du réseau. Par conséquent, tout appareil de mesure ou système de régulation numérique (les équipements de protection) dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro de grandeurs électriques peut être perturbé.

### 1.3.9.5 - Autres effets

Ils sont cités ci - après :

- Augmentation du niveau sonore et de la pulsation du couple dans les machines électriques.
- Accélération du vieillissement des équipements d'éclairage et des batteries de condensateurs.
- Influence sur les relais de protection.

TAB. 1.2 - Conséquences des harmoniques sur les éléments du réseau [4] - [6].

Matériels	Gêne liée à la pollution harmonique	Seuils admissibles de distorsion
Alternateurs	- Pertes supplémentaires, dans les enroulements statoriques et, principalement, dans les amortisseurs, liées à la circulation des courants harmoniques.	Distorsion de tension = 10 % (pour petites machines) Distorsion de courant = 5 % (machines de fortes puissances)
Lignes	- Pertes ohmiques supplémentaires.	Distorsion de tension = 3 % Distorsion de courant = 1.7 %
Câbles	- Pertes ohmiques supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques d'ordres 3 ou homopolaires. - Pertes diélectriques liées à la distorsion de tension pouvant entraîner des détériorations. - Corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation des courants harmoniques pairs associés à une composante continue.	Distorsion de tension = 10 % Tension harmonique individuelle $\frac{U_h}{U_1} = 7\%$
Transformateurs	- Pertes supplémentaires dans les enroulements liées à la circulation des courants harmoniques. - Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault). - Risque de saturation en présence des composantes continues.	Distorsion de tension = 10 % Distorsion de courant = 7 %
Moteurs	- Pertes supplémentaires dans les enroulements, principalement, liées à la distorsion de tension, proportionnelle à $\frac{U_h^2}{h^2}$ - Limitation des performances en puissance.	Distorsion de tension = 15 % Distorsion de courant = 10 %
Circuits de protection divers de la clientèle	- Risque de déclenchements impératifs attribués aux distorsions de tension et à des particularités des circuits alimentés.	Présence de perturbation si $6\% < \frac{U_h}{U_1} < 12\%$

Lampes à décharge pour éclairage, appareils médicaux & générateurs de rayons X	- Risque de vacillement sous l'effet de tension harmonique de rang 2. - Perturbation par surtension en valeur de crête liée aux distorsions de la tension.	Présence de perturbation si $\frac{U_h}{U_1} = 3\%$ Présence de perturbation si $\frac{U_h}{U_1} = 10\%$
Ordinateurs, électronique de puissance	- Troubles fonctionnels liés à la distorsion de tension.	Distorsion de tension = 5 %
Condensateurs de puissance	- Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant au vieillissement du condensateur.	Tension harmonique individuelle : $\frac{U_h}{U_1} = \frac{83\%}{h}$ non cumulable avec d'autres fréquences harmoniques.

#### 1.4 - NORMES ET REGLEMENTATION [4]

Afin de pouvoir garantir un niveau de qualité suffisant à l'ensemble des utilisateurs, les distributeurs sont amenés à fixer ou à faire fixer des limites aux perturbations engendrées par certains utilisateurs. Pour cela, il s'agit de définir :

- D'une part, un taux de distorsion maximum permettant un fonctionnement correct de la plupart des utilisations (niveau de compatibilité).
- D'autre part, un taux de perturbations maximum pour chacun des utilisateurs, afin que les effets cumulés des différentes perturbations produites, permettent la compatibilité de fonctionnement entre tous les matériaux raccordés sur le même réseau. Tous doivent fonctionner correctement.

Par conséquent, si cette compatibilité est nécessaire entre abonnés, elle l'est également à l'intérieur des installations des abonnés eux-mêmes (tertiaire ou industriel). L'utilisateur final est tributaire du niveau de perturbations induites par les matériels qu'il installe. C'est pourquoi, il est important que les fabricants affichent clairement quels sont les niveaux de perturbations engendrées par leurs produits.

Des normes doivent, donc, fixer les niveaux de perturbations harmoniques acceptables, pour les réseaux et pour les pollueurs afin de limiter, préventivement, les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Ces normes sont appliquées suivant 4 règles :

- **Limites d'émission** : Elles sont fixées soit par installation, soit par appareil. Ces limites garantissent le maintien, en tout point, des niveaux de compatibilité.
- **Niveaux d'immunité** : Ils permettent de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites.
- **Niveaux de compatibilité** : Ils sont, généralement, des taux de tension harmonique à ne pas dépasser en tout point du réseau. Le maintien de ces niveaux garantit un fonctionnement correct de tous les appareils.
- **Niveaux de planification** : Ils représentent des seuils de perturbations décidés par un gestionnaire de réseau, tel que le niveau de compatibilité qu'il ne soit pas dépassé.

Par exemple, la norme CEI 1000-2-2 pour les équipements raccordés à un réseau basse tension permet de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites. Un extrait de la norme CEI 1000-2-2 est donné au tableau 1.4

TAB. 1.3 - Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques [7].					
Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique H	Tension harmonique %	Rang harmonique H	Tension harmonique %	Rang harmonique H	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	> 21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			> 12	0,2
25	1,5				
> 25	12.7 / h				

**I.5 – Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, la fluctuation de tension et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Par conséquent, des effondrements éventuels des réseaux deviennent fortement probables.

La pollution harmonique est un problème relativement récent. Il apparaît de façon remarquable qu'un pollueur de réseau peut être également victime des harmoniques. Cette pollution affecte non seulement la propre installation, mais aussi les consommateurs voisins. La technologie récente permet de compenser à peu près toutes les irrégularités survenant sur les réseaux. En contrepartie, un investissement non négligeable est requis. Une telle protection s'imposera à l'avenir de plus en plus.



# Chapitre 02

## **Solution De Dépollution Des Harmoniques**

## **2 - SOLUTION DE DÉPOLLUTION DES HARMONIQUES**

### **2.1 - INTRODUCTION [12,13]**

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. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques. Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en 2 types (courant et tension), 2 groupes de solutions de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées.

### **2.2- SOLUTIONS TRADITIONNELLES [3]**

L'existence des perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre, impérativement, des dispositions afin d'atténuer ou d'éliminer leurs conséquences sur les équipements électriques et sur les réseaux électriques. Sur cette base, il semble donc nécessaire de décrire de manière sommaire les principaux dispositifs et solutions existants utilisés pour le traitement de perturbations.

#### **2.2.1 - Surdimensionnement de l'installation électrique**

Dans ce cas, les harmoniques ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Les effets néfastes de la pollution harmonique sont à éviter pendant une durée limitée. Pour les installations nouvelles, on procède au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Dans le cas d'installations existantes, on décline les équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques (câbles du neutre, transformateur). Cette méthode ne permet pas de tirer profit du potentiel réel de l'installation. Il en résulte un accroissement important du coût de l'installation.

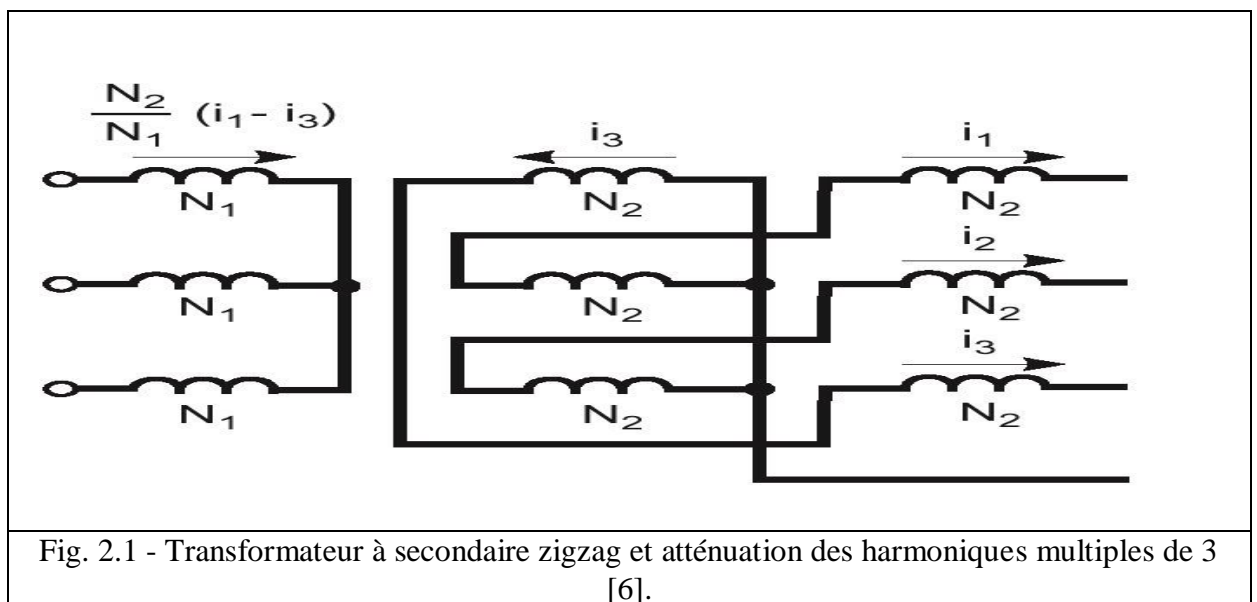
#### **2. 2.2 - Augmentation de la puissance de court-circuit**

En l'absence de tout phénomène de résonance, la puissance harmonique globale augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue. On s'efforcera alors d'alimenter les équipements perturbateurs à partir du point du réseau où la puissance de court-circuit disponible est la plus élevée.

Les courants harmoniques des charges non linéaires étaient modélisés par des sources de courant indépendantes du réseau. Dans la réalité, ce modèle est très approximatif. Les courants harmoniques sont influencés par l'impédance du réseau amont. Lorsque celle-ci croît, en général les courants harmoniques décroissent. Ce qui signifie que pour augmenter l'impédance, on augmente la puissance de court-circuit. Des essais ont été réalisés sur une alimentation à découpage, en modifiant l'impédance de la source (TAB. 2.1). On peut constater que les harmoniques de courant de valeurs les plus élevées décroissent fortement lorsque l'impédance de la source croît.

### 2.2.3 - Transformateur à couplage spécial

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag (Fig. 2.1), empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Il limite au contraire la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques.



TAB. 2.1 - Courants harmoniques d'une alimentation à découpage en fonction de l'impédance de source [3].

$Z_s$ [%]	Facteur de puissance $F_P = \frac{P}{S}$	$I_3$ [%]	$I_5$ [%]	$I_7$ [%]	$I_9$ [%]	$I_{11}$ [%]	$I_{13}$ [%]	Taux de distorsion en tension
0.25	0.64	87	64	38	15	1	7	2.8
0.5	0.65	85	60	33	11	4	7	3.5
1	0.68	81	52	24	6	7	6	5.4
2	0.72	76	42	14	7	6	3	7.5
4	0.75	69	29	8	8	4	4	11.2
6	0.77	63	21	8	6	3	3	14.2
8	0.78	59	17	8	5	3	2	16.8

L'utilisation des transformateurs primaires étoiles (sans neutre) et à secondaires zigzags est une solution intéressante. Ce couplage permet d'avoir le minimum de distorsion au secondaire. En effet, dans ce cas, les courants harmoniques de rang  $3 \cdot h$  ne circulent pas au primaire du transformateur et l'impédance  $Z_s$  ne dépend que des enroulements secondaires.

### 2.2.4 - Modification du convertisseur polluant

Afin de limiter les risques de pollution d'un réseau électrique, il est parfois possible de remplacer la structure du convertisseur de puissance et/ou de sa commande pour intervenir, directement, sur la source des perturbations. Plusieurs solutions sont envisageables, parmi elles, on cite [14] :

#### 2.2.4.1 - Redresseurs dodécophasés

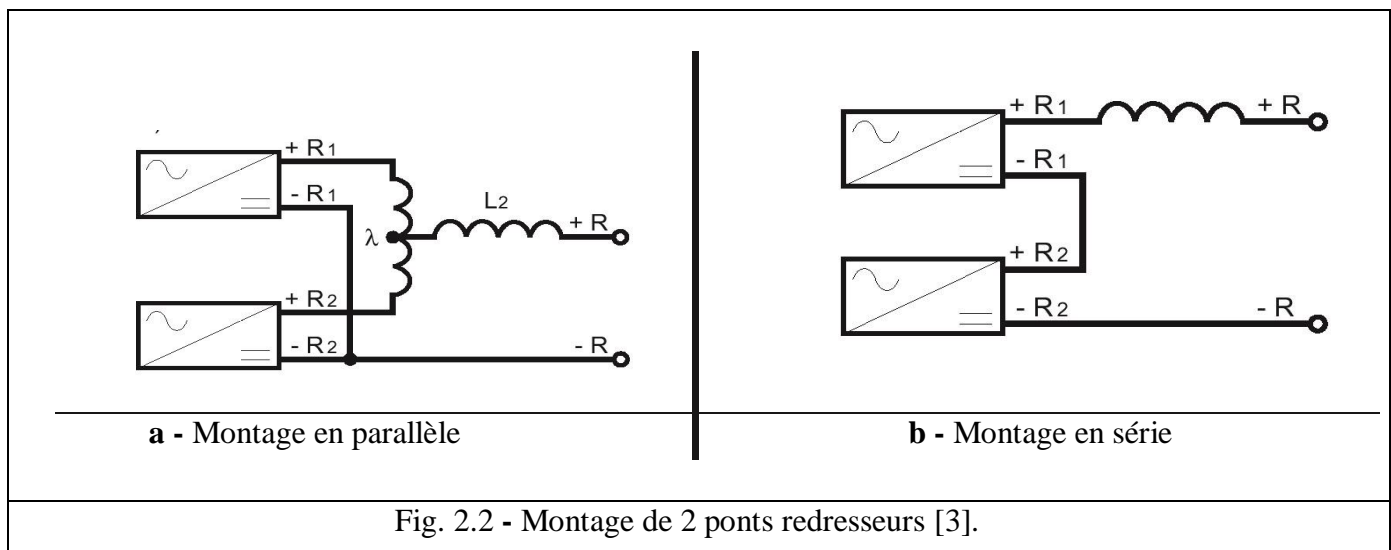
Il s'agit de connecter 2 ponts triphasés, judicieusement déphasés, en parallèle côté réseau et reliés côté redressé. Le déphasage est obtenu à l'aide d'un transformateur à 2 secondaires bobinés l'un en triangle et l'autre en étoile (Fig. 2.2).

### 2.2.4.2 - Méthodes d'injection d'harmonique dans le neutre

Ces techniques réduisent de manière significative les harmoniques créés au secondaire d'un transformateur triphasé alimentant un pont redresseur à diodes, en injectant un courant de fréquence multiple de 3 dans le neutre [15].

### 2.2.4.3 - Transformateurs de réjection de l'harmonique 3

L'originalité est de réduire l'influence de l'harmonique 3 en insérant dans le circuit, un transformateur étoile-triangle ou zigzag-triangle, fonctionnant à vide, pour créer une circulation de flux de fréquence multiple de 3 [15].



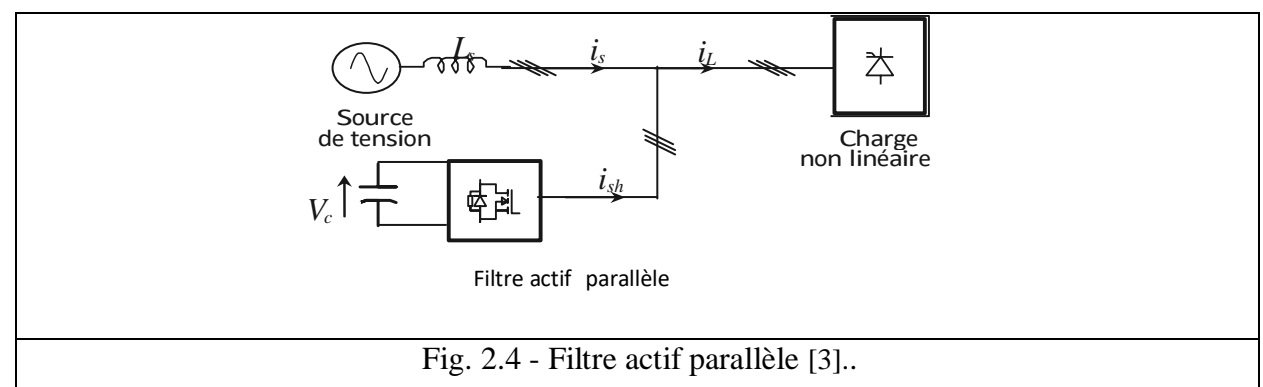
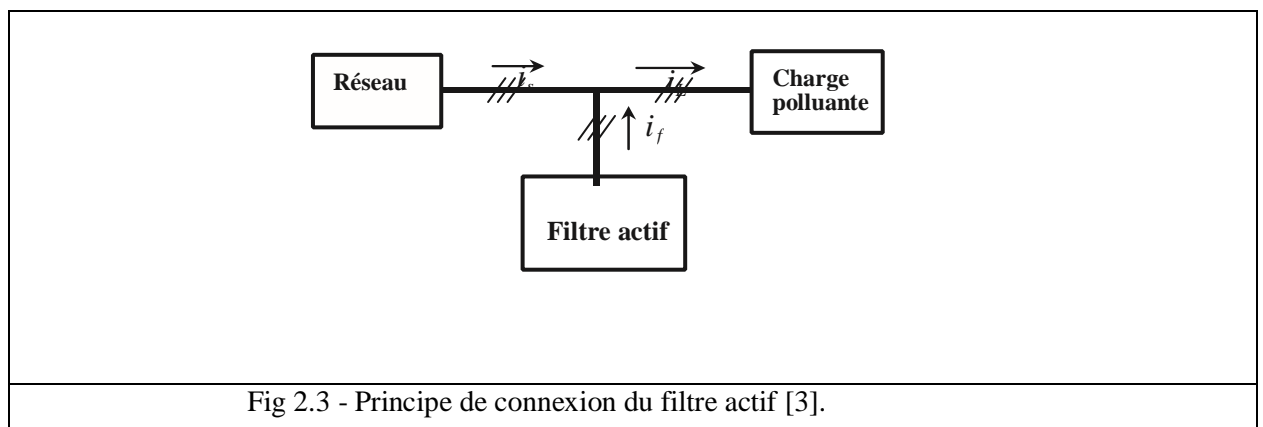
## 2.3 - SOLUTIONS NOUVELLES

### 2.3.1 - Filtre actif ou conditionneur actif d'harmoniques

Le développement récent des semi-conducteurs de puissance, entièrement, commandables, les thyristors, les GTO et les IGBT et en particulier, la maîtrise de leur mise en œuvre et l'existence de nouvelles méthodes de traitement numérique du signal ont permis de développer un moyen moderne et efficace d'élimination des perturbations harmoniques : le filtre actif ou compensateur actif d'harmoniques. Un filtre actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution harmonique (Fig. 2.3). A la différence, un conditionneur actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution de plusieurs perturbations telles que les chutes de tension, les déséquilibres..., incluant le traitement harmonique [17,18].

### 2.3.2 - Filtre actif de puissance parallèle

Le filtre actif parallèle (Fig. 2.4) peut être considéré comme un générateur de courant ou de tension. Dans le cas de générateur de courant, ce filtre est commandé de façon à injecter au réseau des courants égaux à ceux générés par la charge, mais de phases opposées. Le courant de source après compensation est sinusoïdal. Par contre, la tension au point de connexion ne sera sinusoïdale que si la source de tension du réseau est exempte d'harmoniques. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir. En plus, le filtre peut aussi compenser le courant réactif mais avec un dimensionnement plus important. Lorsque celui-ci se comporte comme un compensateur de courants harmoniques, il permet de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charges non linéaires. Par contre, lorsqu'il se comporte comme un compensateur de tension harmonique, il permet alors de maintenir sinusoïdale la tension au point de raccordement quel que soit le courant absorbé par la charge et quel que soit la qualité de la source de tension. En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son indépendance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables [18].



### 2.3.3 - Filtre actif de puissance série

Ce type de compensateur connecté en série sur le réseau de distribution se comporte comme une source de tension harmonique qui s'oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source. Il s'oppose, également, à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l'impédance du réseau rendant sinusoïdale la tension aux bornes de la charge polluante. Son rôle d'isolateur empêche les courants harmoniques de remonter vers le réseau [19]. Dans ce cas, le filtre protège les installations sensibles des perturbations provenant du réseau tel que les harmoniques, les surtensions et les déséquilibres. Si la charge génère des courants harmoniques, le filtre série ne permet pas de corriger ces courants et en cas de court-circuit de la charge, le compensateur doit supporter toute la tension du réseau et tout le courant de court-circuit. D'où, un moyen de protection s'avère dispensable qui lui compense soit les courants harmoniques consommés par la charge ou par la distorsion de tension déjà présente sur le réseau [20]. Le montage est représenté à la (fig.2.5)

Pour ce cas, le filtre actif série se comporte comme une impédance infinie aux fréquences harmoniques et comme une impédance nulle à la fréquence fondamentale. Son rôle d'isolateur empêche ainsi les courants harmoniques de remonter vers le réseau. Toutefois, la mise en œuvre de la topologie d'un filtre actif série présente quelques inconvénients :

Il est toujours parcouru par la totalité du courant absorbé par la charge, y compris le courant fondamental.

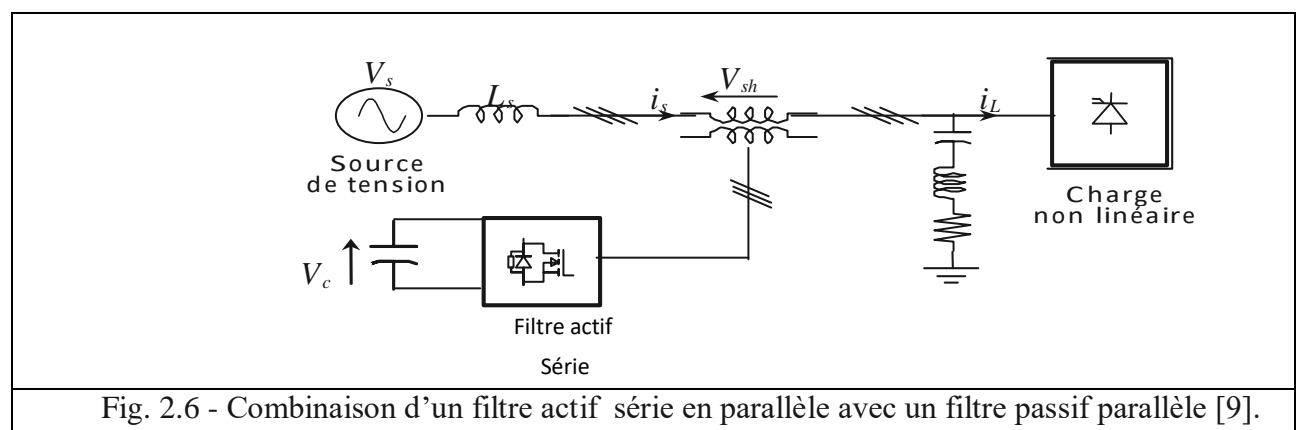
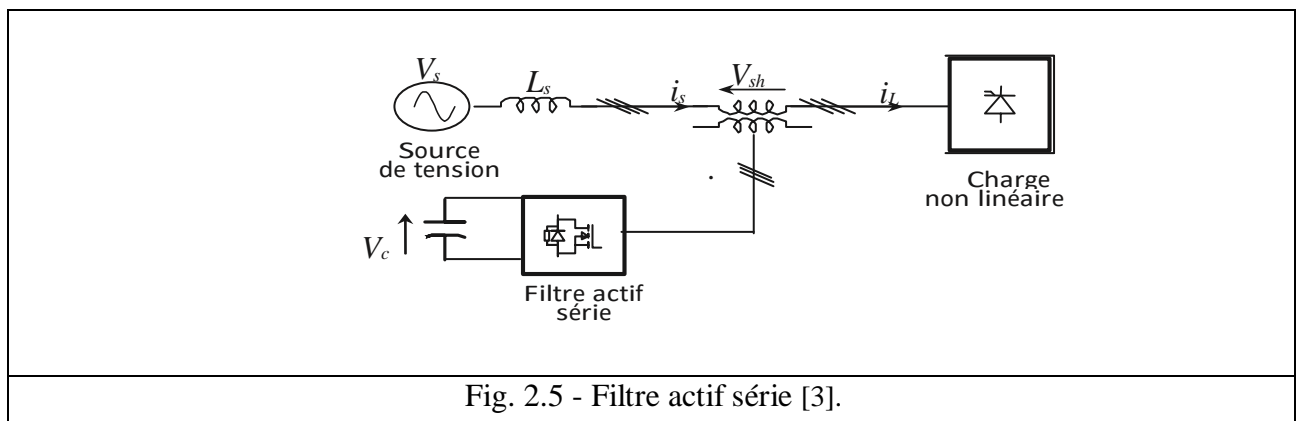
- En cas de court-circuit de la charge, le filtre actif de puissance série devient la seule charge du réseau et risque d'être détruit. Ceci nécessite des protections supplémentaires.

### 2.3.4 - Filtre actif de puissance hybride

C'est l'association de filtres actifs séries de faibles puissances à des filtres passifs. Cette solution semble être prometteuse car elle réduit le dimensionnement du filtre actif de puissance, par conséquent, leurs prix. De plus, leurs potentialités d'application ne cessent de s'accroître et la fréquence de commutation est, considérablement, réduite [18]. Différentes configurations existent, parmi elles, on présente :

### 2.3.4.1 - Filtre actif de puissance série en parallèle avec des filtres passifs parallèles

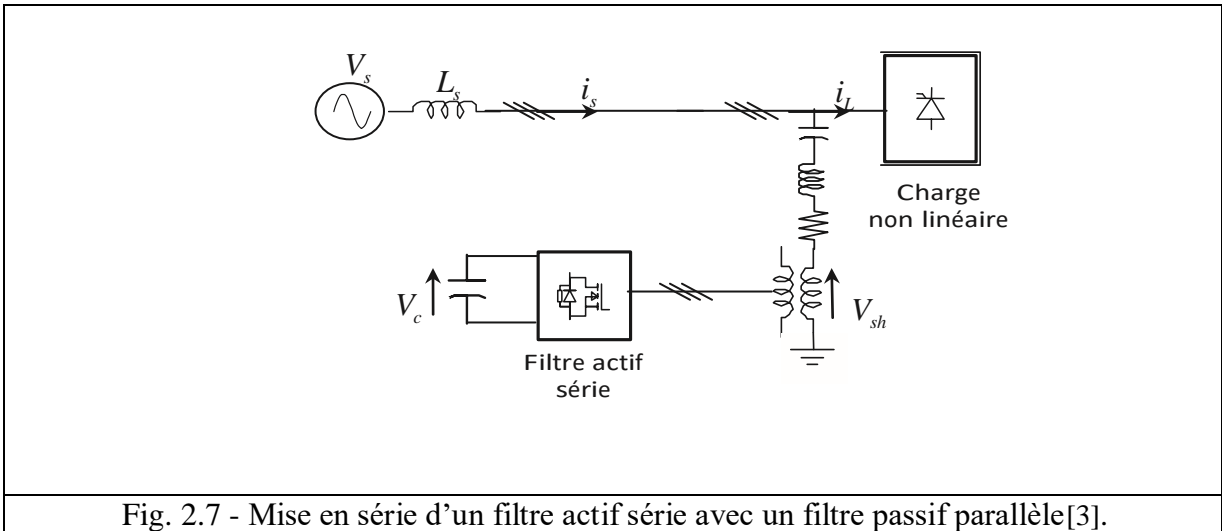
Le schéma de principe de ce système de filtrage est donné par la figure 2.6. Il est constitué de filtres passifs accordés aux fréquences des harmoniques prépondérantes tels que le 5<sup>ème</sup> et le 7<sup>ème</sup> harmonique et d'un filtre actif série dont le rôle est de renforcer l'efficacité des filtres passifs en empêchant les courants harmoniques de remonter. Il réduit, ainsi, les risques d'antirésonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau [22].



### 2.3.4.2 - Filtre actif de puissance série en série avec des filtres passifs parallèles

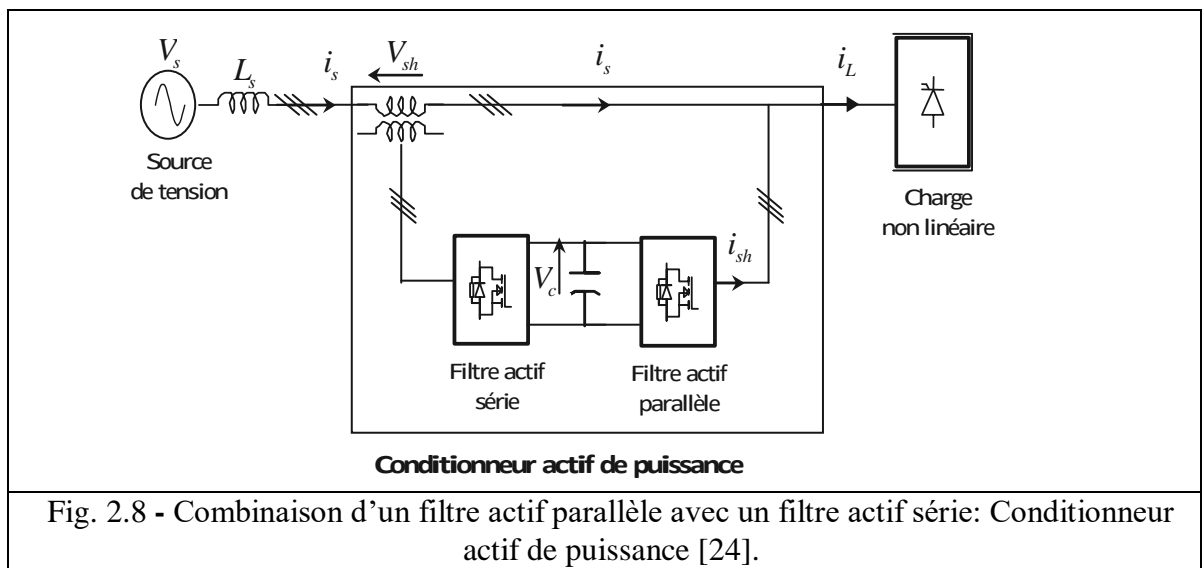
Dans cette configuration, le filtre actif est placé en série avec les filtres passifs parallèles telle que le montre la figure 2.7. Cette structure à 2 avantages. D'une part, le courant qui le traverse est moins important. Par conséquent, la puissance du filtre actif série est plus faible que celle du filtre hybride. D'autre part, le filtre actif série n'étant plus connecté en série avec la charge, par conséquent, en cas de court-circuit dû à cette même charge, le filtre actif n'est plus affecté [23].





### 2.3.4.3 - Conditionneur actif de puissance

Nous remarquons d'après ce qui précède, que ni le filtre actif de puissance parallèle, ni le filtre actif de puissance série n'est capable de réaliser un filtrage complet donnant une tension sinusoïdale du côté de la charge et un courant exempt d'harmoniques du côté du réseau [23]. Cet objectif n'est atteint, qu'en utilisant un filtre actif de puissance mixte composé de 2 filtres actifs de puissance, l'un connecté en série et l'autre en parallèle avec la charge, comme le montre la (fig 2.8.)



Cette structure mixte appelée conditionneur actif de puissance constituera la principale application des filtres actifs de puissance dans l'avenir en restant pour l'instant très onéreuse.

### 2.3.4.4 - Redresseur à principe de la MLI

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant sinusoïdal. Les convertisseurs propres, tels que les redresseurs MLI, sont formés par des semi-conducteurs à fermeture et ouverture commandées, auxquels sont associées des diodes (Fig. 2.9). Ils utilisent, de façon générale, la technique de commutation dite MLI. Elle a pour rôle de repousser les harmoniques vers les fréquences élevées [22]. Il existe 2 grandes applications utilisant ces convertisseurs :

- Fonctionnement en convertisseur d'énergie à faible taux de pollution harmonique et à consommation de puissance ne réactive nulle. Ce convertisseur permet une consommation ou un renvoi d'énergie active sur le réseau.
- Fonctionnement en compensateur d'énergie réactive à forte dynamique et à encombrement réduit.

L'application principale est la compensation de la fluctuation rapide de la tension (flicker) et la stabilisation de réseau à haute tension.

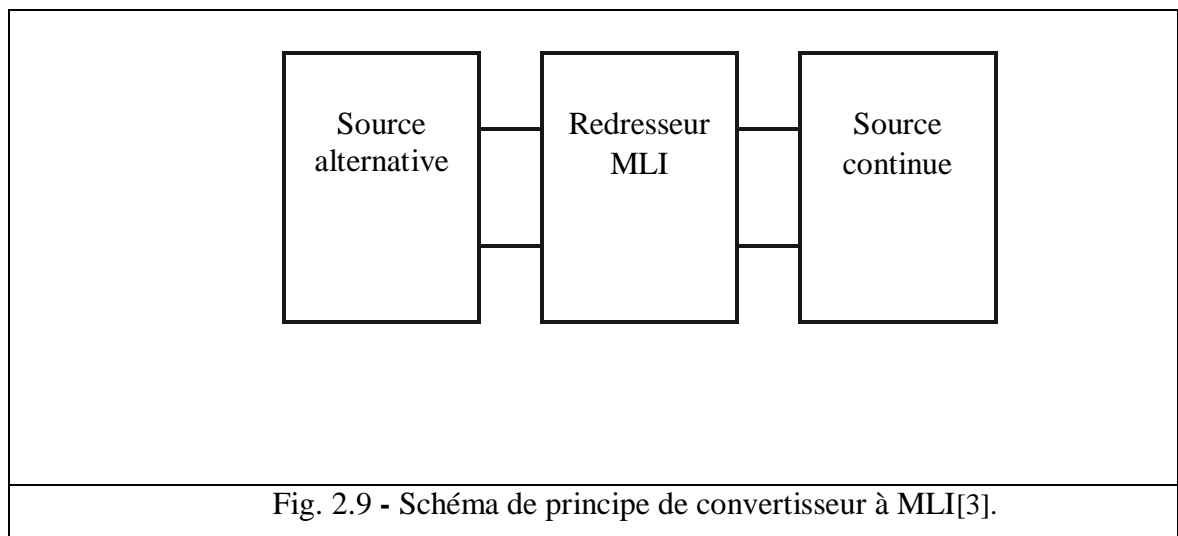


Fig. 2.9 - Schéma de principe de convertisseur à MLI[3].

## 2.4 - SOLUTIONS NON CONVENTIONNELLES

En plus des solutions classiques et modernes déjà décrites, d'autres solutions plus récentes sont apparues pour le traitement des perturbations. Parmi elles, on cite :

### 2.4.1 - Système Improved Power Quality AC-DC Converter IPQC

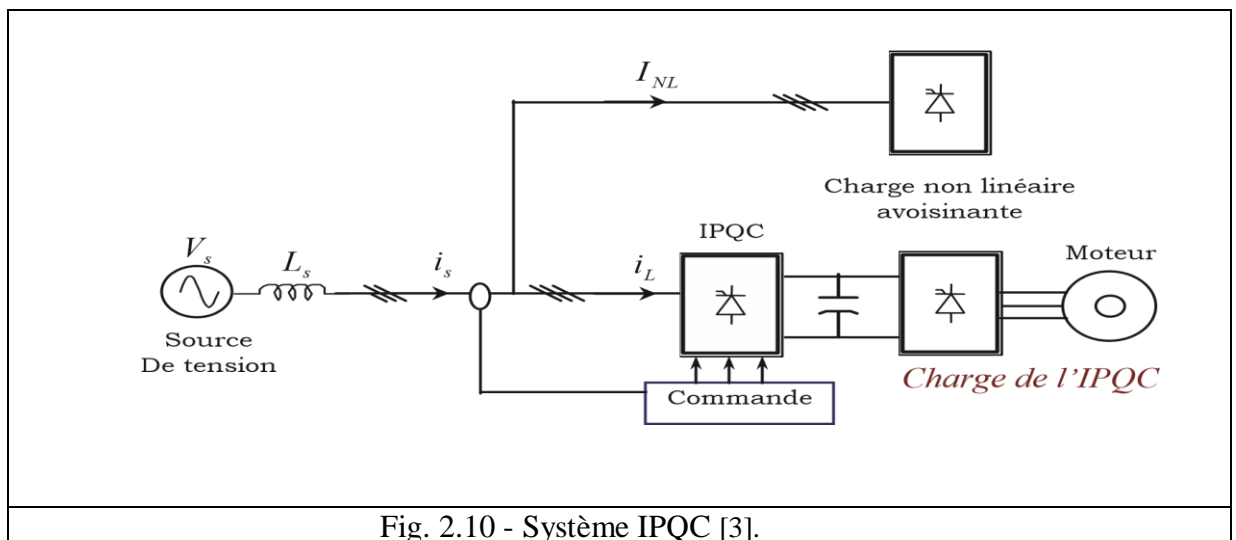
Il a pour rôle d'alimenter, d'une part, une charge non linéaire et d'autre part de compenser de part sa commande toutes les charges non linéaires avoisinantes, sources de pollution

harmonique, comme le montre la figure 2.10 [26]. Les avantages rencontrés lors de l'utilisation de cette solution d'après leurs auteurs sont :

- Amélioration du facteur de puissance.
- Amélioration du contenu harmonique du courant de source.
- Fonctionnement du redresseur actif dans les 4 quadrants.
- Non utilisation d'un filtre actif de puissance parallèle.

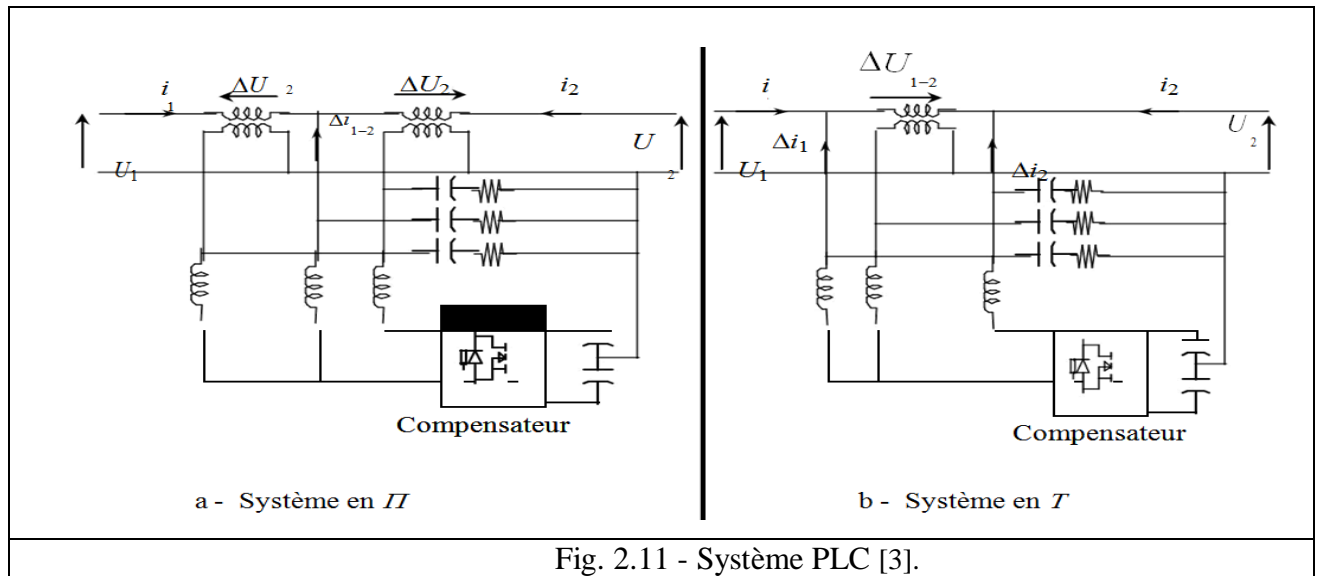
Cependant des inconvénients existent. Parmi elles, on cite :

- Implémentation de son circuit de protection très complexe.
- Charges non linéaires à traiter doit avoisiner le redresseur actif.



### 2.4.2 - Système Power Line Communication PLC

Il est basé sur une nouvelle configuration d'onduleur jouant le rôle de filtre actif de puissance où chaque phase du compensateur est reliée, différemment, à la même phase monophasée de la source, comme le montre la figure 2.11 [25].



### 2.4.3 - Filtrage actif à l'aide d'une machine synchrone à double alimentation

Cette solution est d'un intérêt certain car elle présente les avantages suivants :

- Compensation sélective d'harmonique.
- Réduction de l'encombrement lié à ce mode de filtrage. Cet avantage est, particulièrement, intéressant pour des dispositifs de filtrage dits embarqués.
- Adaptabilité aux variations de la fréquence du réseau.
- Pertes joules dues au régime fondamental, principalement, constituées des pertes dans la résistance du circuit bouchon, sont faibles pour ce type de montage. Pour le régime harmonique, ces pertes sont dissipées au niveau des résistances statorique et rotorique de la machine.

Toutefois, ce mode de filtrage présente quelques inconvénients. Parmi elles, on note :

- Non possibilité de filtrer plusieurs harmoniques simultanément et efficacement.
- Risques de résonance entre le réseau, la machine et le circuit bouchon ne sont pas écartés, contrairement à l'emploi de filtres actifs constitués d'onduleurs [28].

## 2.5 – CONCLUSIONS [3].

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans un réseau électrique BT. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

- Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et les déséquilibres.
- Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle-série active est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

# Chapitre 03

## **Généralités sur les éoliennes**

### 3 - GENERALITES SUR LES EOLIENNES

#### 3.1- INTRODUCTION [34]

Ce chapitre comportera des généralités sur les éoliennes. Divisé en quatre parties, la première suivra l'évolution de l'utilisation de la force éolienne dans l'histoire. Dans la deuxième partie, nous définirons brièvement le concept de la machine. La troisième partie sera consacrée à la classification des éoliennes selon leur axe de rotation, les différents composants d'une éolienne à axe horizontale ainsi qu'aux différents domaines d'applications des éoliennes. La dernière partie quant à elle, comprendra la définition des différentes caractéristiques de l'énergie éolienne.

#### 3.2-HISTORIQUE

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. La première utilisation de l'énergie éolienne, et sans doute la plus simple, a été la propulsion des bateaux à voiles. Cette énergie aidait le bateau à avancer et remplaçait l'énergie des galériens.

En moyen âge, les Perses furent les premiers à utiliser des éoliennes très simples à axe vertical pour irriguer leurs cultures et aider au meulage du grain. Ce type d'éoliennes va se répandre dans tout le monde arabe puis dans l'occident suite aux croisades [34].

Au 16<sup>ème</sup> siècle, elles ont été utilisées pour pomper de l'eau et couper le bois. En 1891, le danois Poule La Cour inventa le premier aérogénérateur qui a pour but de produire de l'électricité [29]. Aux débuts du 20<sup>ème</sup> siècle, a été marquée par la conception de la première éolienne à axe verticale, même si la puissance générée restait assez faible. Il faut attendre jusqu'à 1957 pour que la puissance atteigne les 200kW par le constructeur Danois Gedser [34].

Mais ce n'est qu'après le premier choc pétrolier en 1973, quand les pays exportateurs de pétrole ont diminué leurs exportations que de nombreux pays se sont lancés dans le marché éolien.

Actuellement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement [30].

### **3.3-objectifs**

Les objectifs de ce chapitre sont:

- présenté la machine éolienne
- les différents composants d'une éolienne à axe horizontale et ses domaines d'applications

### **3.4- DEFINITION**

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent, c'est-à-dire le fluide en mouvement, en énergie mécanique. Cette dernière est disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments dont la nacelle, le mât, les pales et le multiplicateur, doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative plus au moins stable à l'énergie nucléaire et d'autres d'origine fossile. Sans pour autant, prétendre à les remplacer de nos jours si nous prenons en compte l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite qui est largement plus faible. Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer. Ces dernières donnent naissance aux fermes éoliennes offshores, où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

### **3.5- LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES [34]**

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

#### **3.5.1- Les éoliennes à axe vertical**

Ces éoliennes ont un axe de rotation à la verticale du sol et presque perpendiculaire à la direction du vent. Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes.



Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine). Ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité (Fig. 3.1)...

Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente. Les deux plus importantes conceptions d'éoliennes à axe vertical sont : Darrieus et Savonius.



Fig. 3.1 -Eolienne à axe vertical [34]

### 3.5.2- Les éoliennes à axe horizontal

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale du terrain mais aussi presque parallèle à la direction du vent. La majorité des éoliennes présentes dans le marché appartiennent à cette catégorie [30]. Même si elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, elles présentent néanmoins un rendement aérodynamique plus élevé. De plus, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Par contre, elle rend sa conception plus complexe mais aussi plus coûteuse (Fig 3-2). [30].



Fig. 3.2- Eolienne à axe horizontal [34].

### 3.6- PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL

Les différents composants d'une éolienne à axe horizontal sont présentés dans la (Fig. 3.3). [31].

- 1- Pales en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stal (décrochage aérodynamique). Freins aérodynamiques d'extrémité pivotants.
- 2- Moyeu du rotor en fonte.
- 3- Structure de la turbine en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4- Paliers du rotor à double rangée de billes.
- 5- Arbre lent du rotor en acier haute résistance.
- 6- Multiplicateur de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
- 7- Frein à disque sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
- 8- Accouplement avec la génératrice de type flexible.
- 9- Génératrice asynchrone de (1500kW).
- 10- Radiateur de refroidissement intégré au système multiplicateur - génératrice.
- 11- Système de mesure du vent (anémomètre et girouette) transmettant les signaux au système de contrôle de la turbine.
- 12- Système de contrôle surveillant et pilotant la turbine.
- 13- Système hydraulique pour les freins d'extrémité de pale et le système d'orientation.
- 14- Entraînement d'orientation de la tourelle à deux trains d'engrenages planétaires entraînés par des moteurs alimentés à fréquence variable.
- 15- Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque.
- 16- Capot de la nacelle en structure acier recouverte de composite fibre de verre.
- 17- Tour en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

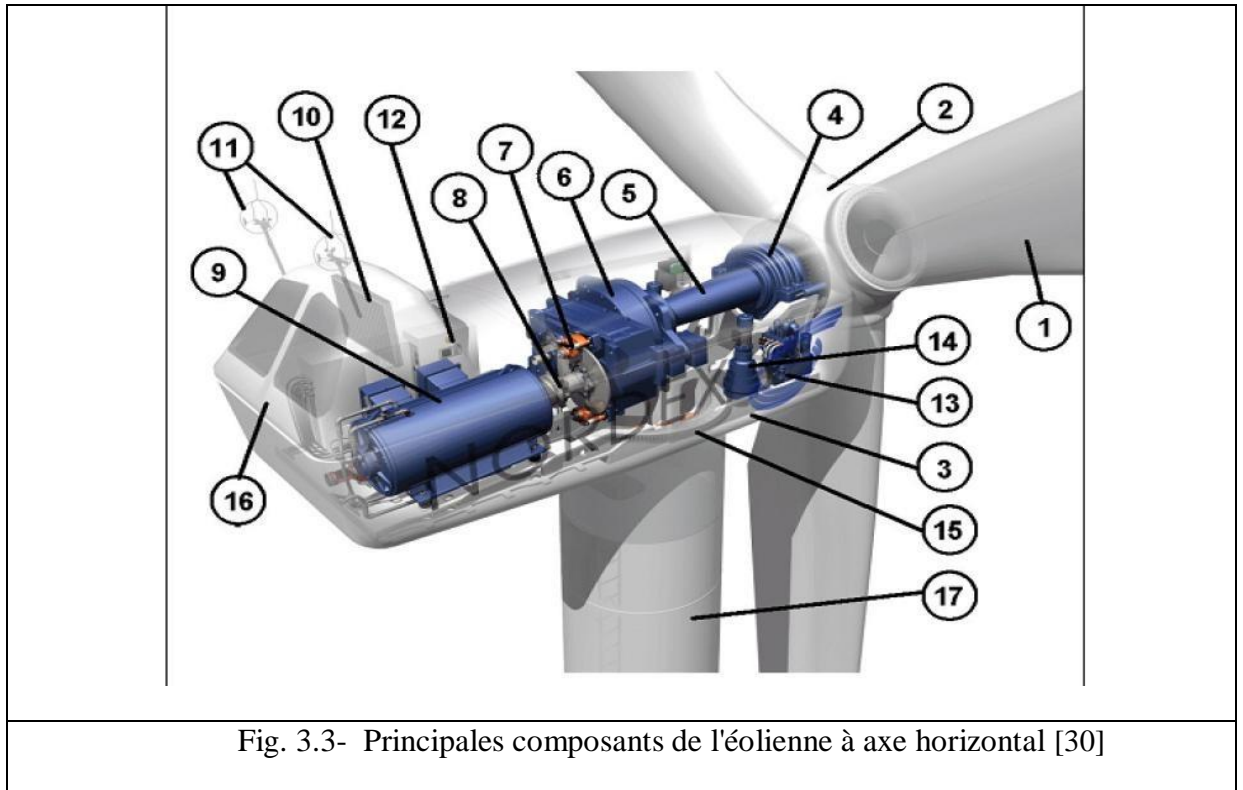


Fig. 3.3- Principales composantes de l'éolienne à axe horizontal [30]

### 3.7- APPLICATIONS DES EOLIENNES

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration:

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. D'une part, la complémentarité avec les moyens traditionnels de production, comme les centrales thermiques classiques ou nucléaires et les barrages pour des régions disposant d'une infrastructure existante. D'autre part, la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions

peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement. Comme pour l'alimentation d'unités de désalinisation, la cogénération avec des groupes diesels et des panneaux photovoltaïques [30].

### 3.8- POTENTIEL ENERGETIQUE

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique, le potentiel éolien disponible subit une succession de pertes, jusqu'à la sortie de l'aérogénérateur [30]. Ainsi, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné est réellement obtenue en fin de processus.

#### 3.8.1- Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique [30]

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur.

En effet, si nous considérons une masse d'air  $m$ , qui se déplace avec la vitesse  $v$ , l'énergie cinétique de cette masse  $E_c$  est :

$$E_c = m (1/2) V^2 \quad (3-1)$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être entièrement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface  $S$ , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent. La puissance instantanée fournie serait :

$$P = \rho S V^3 (1/2) \quad (3-2)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air.

La puissance qui peut être fournie par une éolienne est fonction de trois principaux paramètres : l'énergie éolienne disponible, la courbe de puissance de la machine ainsi que la capacité de l'aérogénérateur à réagir aux fluctuations du vent.

#### 3.8.2- Le coefficient de puissance [30]

Parce que la vitesse en aval du dispositif de récupération n'est jamais nulle, la puissance ne peut être captée en sa totalité, le dispositif de conversion extrait une partie seulement  $P_m$  de la puissance incidente  $P_v$ .

Ainsi, la puissance  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime comme suit :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p(\lambda) \quad (3-3)$$

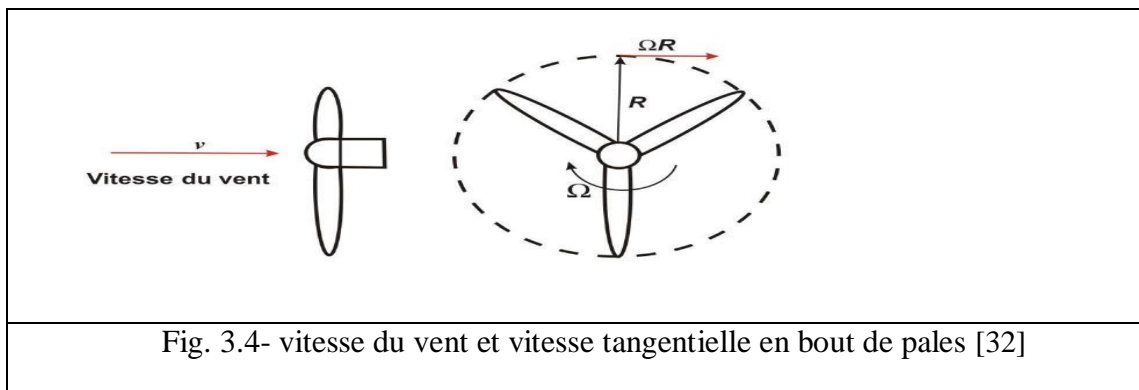
Le coefficient  $C_p$  est une grandeur variable inférieure à 1, dit aussi rendement. Ce dernier est propre à chaque éolienne qui lie la puissance fournie par l'éolienne  $P_m$  est la puissance du vent disponible à l'entrée de la voilure par la relation suivante. :

$$C_p = P_m / P_v \quad (3-4)$$

### 3.8.3- Le coefficient de vitesse réduite

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée, dite la vitesse réduite  $\lambda$ . Elle représente le rapport entre la vitesse tangentielle en bout de pales de la turbine et de la vitesse du vent (Fig. 3.4). Ainsi, la vitesse réduite est donnée par la relation suivante :

$$\lambda = \Omega R / V \quad (3-5)$$



Avec  $R$  le rayon de la voilure et  $\Omega$  la vitesse de rotation.

### 3.8.4- Limite de Betz

On peut estimer la valeur maximale de ce rendement, par la formule de Betz [30]. Cette dernière démontre qu'indépendamment du modèle de turbine, seuls 16 / 27<sup>èmes</sup> (59 %) de l'énergie cinétique du vent peuvent être transformés en énergies mécanique. Représentant ainsi la puissance maximale qui peut être récupérée par une éolienne. C'est la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée limite de Betz du coefficient de puissance.

$$C_p = 16/27 = 0.593 \quad (3-6)$$

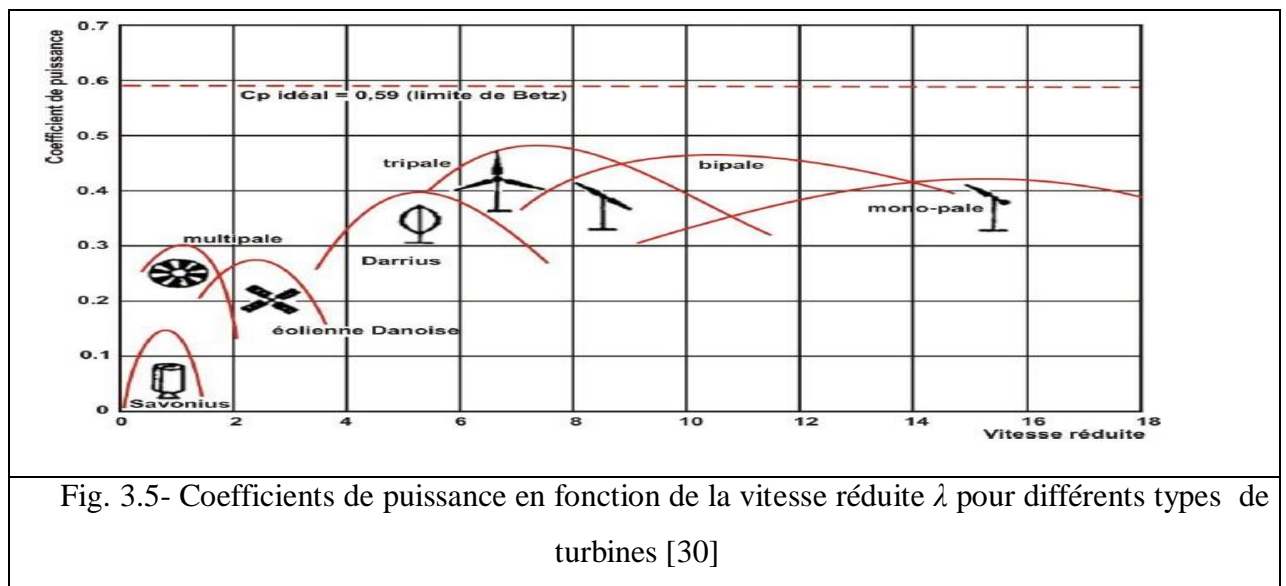
Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse réduite  $C_p$ .

### 3.8.5- Classement des types d'éoliennes en fonction du coefficient de puissance

La valeur du coefficient de puissance  $C_p$  dépend aussi de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse réduite  $\lambda$ .

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (3-7)$$

Ainsi, et sur le plan aérodynamique, nous pouvons comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients de puissance en fonction de la vitesse réduite  $\lambda$  comme donné dans la (Fig. 3.5).



On remarque en tout premier lieu que les éoliennes à axe horizontal, dites à vitesse rapide, possèdent potentiellement un rendement plus important que les autres formules. Ceci explique leur domination dans le marché des machines actuelles, où la courbe du coefficient de puissance atteint son maximum pour une gamme de  $\lambda$  comprise entre 5 et 15.

Dans un premier temps, le coefficient de puissance augmente avec la vitesse réduite. Il atteint un maximum pour une certaine valeur de  $\lambda$  puis diminue même avec une augmentation de la vitesse réduite. Ces variations de  $C_p(\lambda)$ , restent bien en dessous de la limite de Betz.

Elles dépendent de plusieurs propriétés aérodynamiques, mais essentiellement de plusieurs éléments dans la conception du rotor, notamment, dans le nombre de pales utilisées.

On remarque aussi que pour une éolienne tripale, le coefficient de puissance est maximal pour  $\lambda = 7$ , c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse réduite que l'on maximise le rendement aérodynamique. Il est à noter aussi, qu'à diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation bien plus élevée qu'une tripale.

Par contre, en utilisant le coefficient de couple  $C_c$ , défini par la relation :

$$C_p = \lambda C_c \quad (3-8)$$

On comprend tout l'intérêt des petites machines. Ainsi, et pour des  $\lambda$  très faibles, elles possèdent intrinsèquement un couple très important. Dans ce cas, la présence d'un nombre important de pale contribue à la création du couple de démarrage et ce, avec très peu de vent.

Par contre, dès que le vent se renforce, leurs caractéristiques de couple et de puissance s'effondrent rapidement [30].

### 3.9- GENERATEURS

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans ce qui suit.

Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique.

#### 3.9.1- Générateur Asynchrone (GAS)

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.



### 3.9.1.1- Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE)

Jusqu'à présent le GACE correspond au choix prépondérant de par sa simplicité, son bon rendement et une maintenance réduite [32]. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur (Fig. 3.6), ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance.

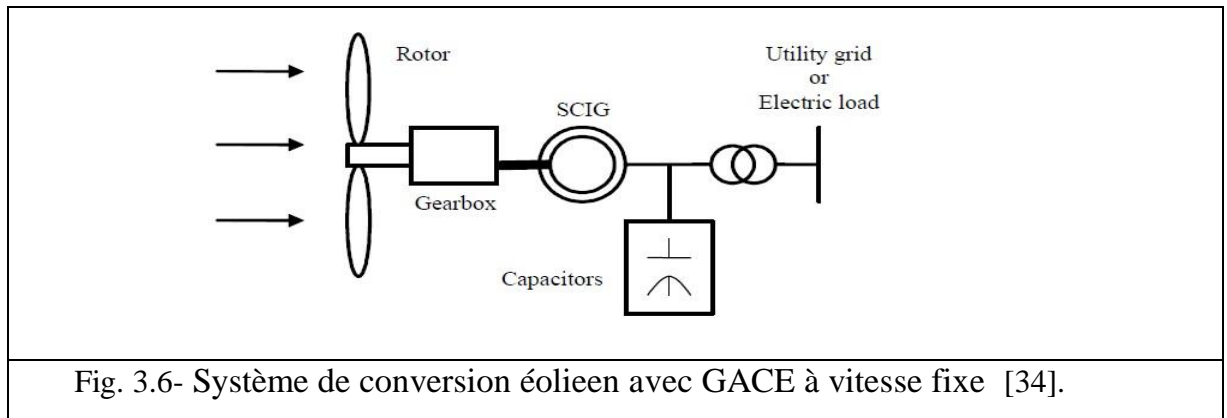


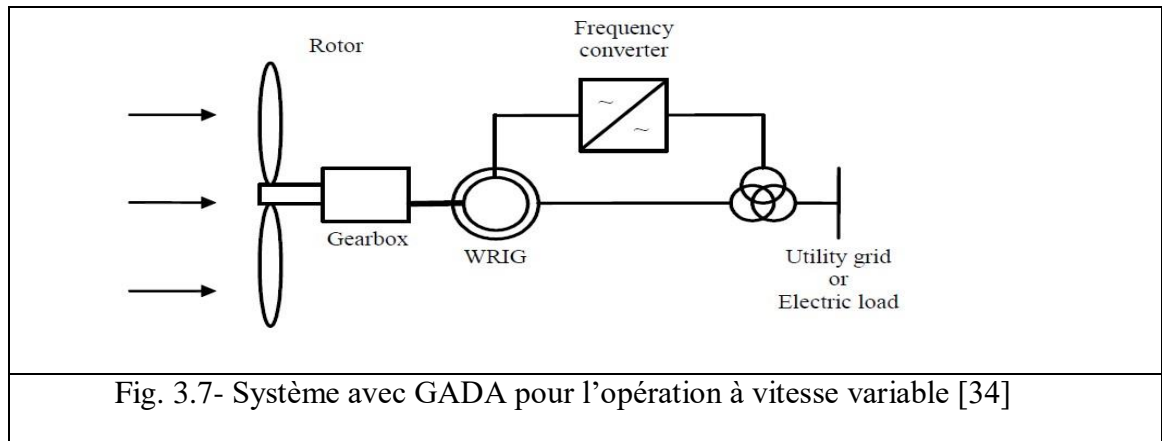
Fig. 3.6- Système de conversion éolien avec GACE à vitesse fixe [34].

### 3.9.1.2-Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné (GARB)

Grâce à un système de bagues et balais, la tension appliquée au rotor peut être commandée par un convertisseur électronique de puissance. De l'énergie pouvant ainsi être appliquée ou extraite du rotor, le générateur peut se magnétiser par le rotor comme par le stator [32].

### 3.9.1.3-Génératrice Asynchrone à double Alimentation (GADA)

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de génératrice asynchrone double alimentation (GADA). Celui-ci est un GARB dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur « back-to-back », qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Fig 3.7).



Les points forts du GADA sont :

- a) Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- b) Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau la puissance réactive nécessaire.
- c) Il est capable d'échanger de la puissance réactive avec le réseau pour faire la commande de tension.
- d) La taille du convertisseur n'est pas simplement en rapport avec la puissance totale du générateur, mais aussi avec la gamme de vitesse choisie. En fait, le coût du convertisseur augmente avec la gamme de vitesse autour de la vitesse de synchronisme.

Son inconvénient réside dans la présence obligatoire de bagues et balais.

### 3.9.2 -Générateur Synchrone (GS)

L'avantage du générateur synchrone sur l'GAS est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du GS peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct (direct-drive) qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses (gerles). Le GS est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique (Fig 3.8), lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (GSAP) est plus simple et moins coûteux.

Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente [32].

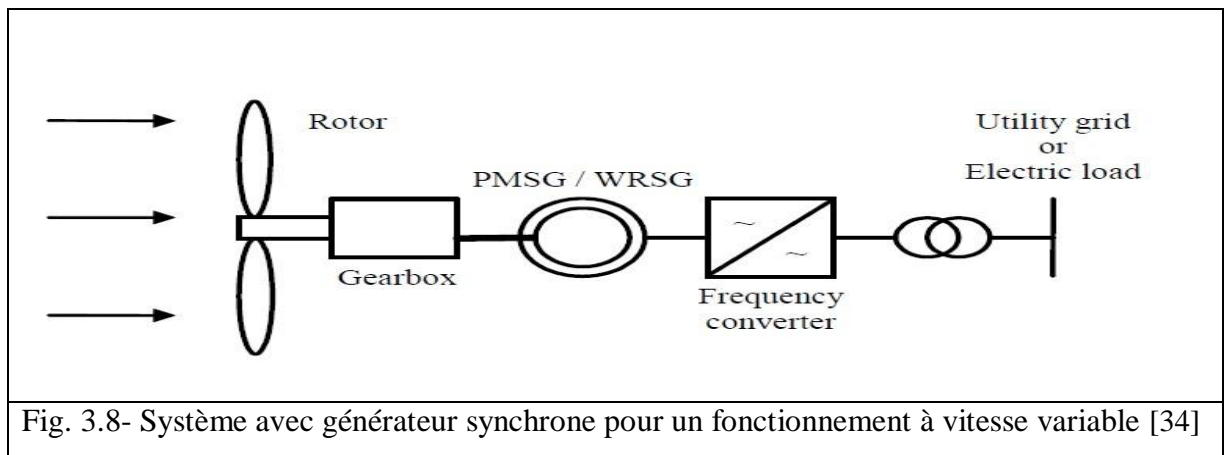


Fig. 3.8- Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable [34]

### 3.9.2.1- Générateur Synchrone à Rotor Bobiné (GSRB)

La connexion directe au réseau de puissance implique que le GS tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable.

Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système.

### 3.9.2.2- Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne [32]. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé.

Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.

### 3.9.3- Autres Générateurs

Les éoliennes raccordées au réseau de puissance nécessitent un transformateur élévateur pour adapter la tension de la machine à celle du réseau. En conséquence, la mise en œuvre de générateurs « haute tension » est une solution en cours d'évaluation. Cela

permettrait, en conséquence, de diminuer les pertes par effet joule du système en éliminant le transformateur.

C'est aussi au niveau de l'onduleur que cela peut-être intéressant avec des IGBT haute tension.

Dans cette optique, les machines synchrones et à induction sont des options intéressantes pour des turbines éoliennes de plus de 3 MW.

Cependant, leur coût élevé, des problèmes de sécurité et de durée de vie limitent leur commercialisation.

Les caractéristiques du générateur à réluctance commutée (GRC) sont la robustesse, une structure simple, un rendement élevé, des coûts réduits et la possibilité de fonctionner sans boîte d'engrenages. Toutefois, son adaptation aux turbines éoliennes n'a pas été étudiée en détail. Les inconvénients consistent en une densité de puissance et un rendement inférieurs à ceux du GSAP. De plus, il nécessite un convertisseur dimensionné pour toute la puissance générée.

L'utilisation du générateur à flux transversal (GFT) est aussi à l'étude. Il s'agit d'une option intéressante, encore peu évoquée pour une application aux systèmes de génération éolienne.

Ce générateur autorise un nombre de pôles élevé pour une application gerles. Cependant, le nombre de composants nécessaires et une technologie encore à ses débuts en limitent son application [32].

Une brève description de chacune de ces technologies génératrices d'éoliennes est maintenant fournie. Nous intéressons à la GADA, le principe de fonctionnement de ce type est plus détaillé dans la section suivante

### **3.10- MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION**

#### **3.10.1-Principe de fonctionnement**

Les machines asynchrones à rotor bobiné permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Si pour les petites puissances (<500kW), la partie mécanique peut généralement subir les variations brutales de régime de vent, ce type de contraintes devient inacceptable pour les fortes puissances. La variation de vitesse devient donc de plus en plus justifiée à mesure qu'on augmente la puissance de l'éolienne. Parmi les critères à prendre en compte pour juger de la qualité d'un tel système, on trouve :

-L'intérêt de maintenir une fréquence stator bien synchronisée par rapport à celle du réseau, afin de ne pas compromettre la stabilité d'ensemble. On peut même imaginer qu'un système „intelligent“ augmente la marge de stabilité. Ce dernier aspect peut jouer sur la limite de puissance raccordable au réseau et permet la suppression, entre stator et réseau, de condensateurs susceptibles de provoquer des résonances.

- Le rendement de la conversion ;
- Le filtrage ou la qualité des formes d'ondes injectées au réseau ;
- Le prix, évidemment.

Pour expliquer son principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance  $P$  est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie,  $(1-g)P$ , est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste  $gP$  sort par les ballais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence  $gf$ . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée par l'intermédiaire du deuxième convertisseur.

Ce réseau reçoit donc  $(1+g)P$ . Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un balai et de collecteurs (Fig. 3.9).

Une fois connecté au réseau un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique [33].

Pendant la rotation, le flux magnétique généré par le stator crée des *f.e.m* dans le bobinage du rotor. Le rapport entre les *f.e.m* créées au rotor et au stator est :

$$E_r / E_s = (N_r / N_s) \cdot (\omega_s - \omega_{mec}) / \omega_s \quad (3-9)$$

$N_r$  et  $N_s$  sont respectivement le nombre de spires des bobinages rotoriques et statoriques.  $\omega_s$  et  $\omega_{mec}$  sont respectivement les pulsations de synchronisme et mécanique de la machine.

En posant :  $g = (\omega_s - \omega_{mec}) / \omega_s$  l'équation (3-10) devient :

$$E_r / E_s = g \cdot (N_r / N_s) \quad (3-10)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$I_r / I_s = N_r / N_s \quad (3-11)$$

Donc le rapport entre la puissance au rotor  $S_r$  et la puissance au stator  $S_s$  devient :

$$(S_r / S_s) = (I_r / I_s) \cdot (E_r / E_s) = g \quad (3-12)$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement  $g$ .

**3.10.2- Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI**

Cette configuration (Fig 3-10) a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO [33]. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

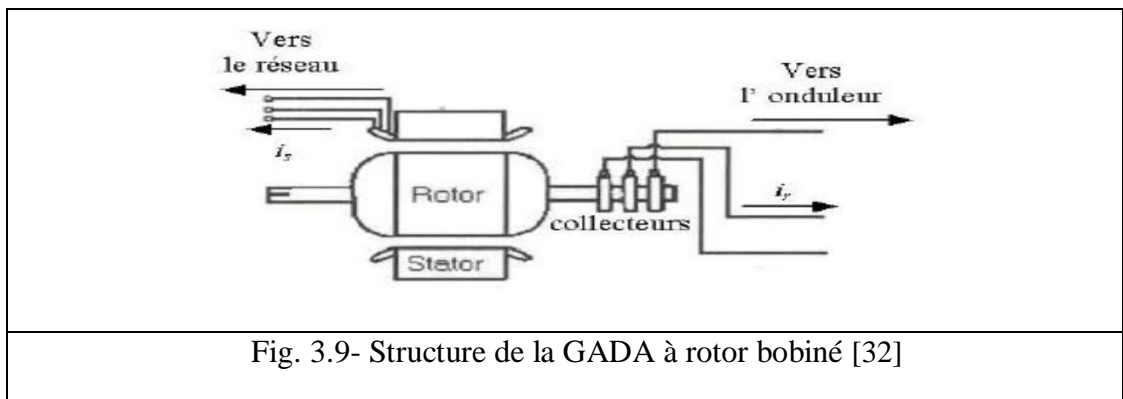


Fig. 3.9- Structure de la GADA à rotor bobiné [32]

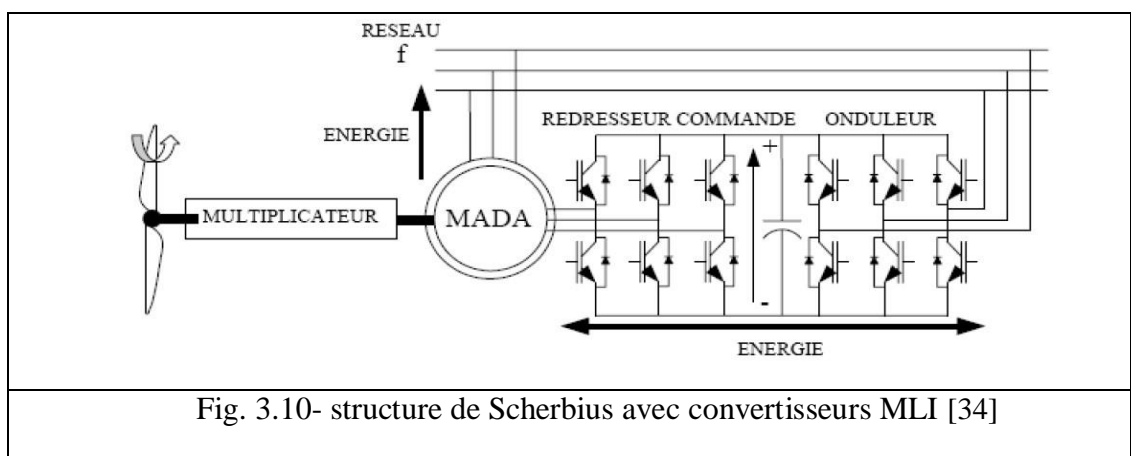


Fig. 3.10- structure de Scherbius avec convertisseurs MLI [34]

Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que les autres types de GADA. Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable.

La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Si le glissement reste inférieur à  $\pm 30\%$  autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance.

De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau [33]. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des  $dv/dt$  importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements.

### **3.10.3-Mode de fonctionnement de la machine à vitesse variable**

En générale, la GADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, mais la différence avec les autres types de machine réside dans le fait que pour la GADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur. En effet nous savons qu'une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au dessus pour être en générateur.

Par contre dans le cas de la GADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hypersynchronisme ou en hyposynchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [33].

#### **- Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone**

Le fonctionnement en mode hyposynchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse s'étendant de la vitesse de synchronisme à une vitesse plus faible. Le quadrant 1-1 de la (Fig. 3.11) montre que la puissance est fournie par le

réseau au stator ; la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, "la puissance de glissement" est renvoyée sur le réseau via les convertisseurs connectés au rotor, c'est la cascade hyposynchrone.

**- Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone**

Le fonctionnement en mode hypersynchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au delà de la vitesse de synchronisme. Dans le quadrant 1-2, nous voyons que dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques et est convertie en puissance mécanique.

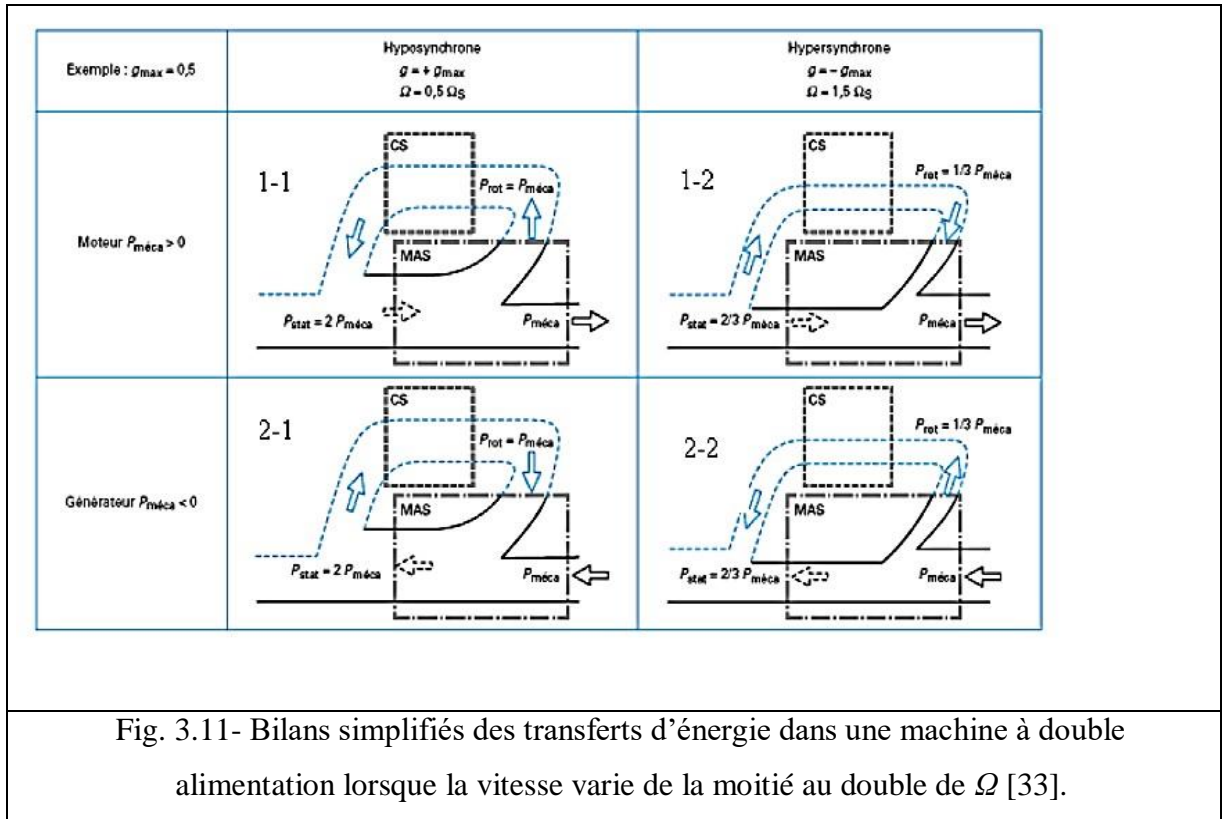
**- Fonctionnement en mode génératrice hyposynchrone**

C'est surtout le mode de fonctionnement en génératrice qui nous intéresse car il correspond parfaitement dans notre cas, à la GADA utilisée dans une éolienne. Dans le quadrant 2-1, la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne ; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

**- Fonctionnement en mode génératrice hypersynchrone**

Dans ce mode de fonctionnement comme le montre le quadrant 2-2, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à  $g.P_{MEC}$  est transmise par l'intermédiaire du rotor.





Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 2-1 et 2-2 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas  $\pm 30\%$  en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de variation de vitesse), la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale. Le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est à dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine. Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbations que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

### 3 - 11.CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la machine éolienne, en donnant les généralités sur son évolution, son utilisation, les deux grandes familles des aérogénérateurs, les différents composants d'une éolienne à axe horizontale et ses domaines d'applications. Ce deuxième chapitre nous permettra de mieux cerner le choix de l'aérogénérateur approprié pour un site avec un potentiel éolien donné.



# Chapitre 04

**simulation et**

**Résultats**

## 4 - SIMULATION ET RESULTATS

### 4.1-INTRODUCTION

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant [35]. Ce compensateur peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et le fondamental réactif [36,37]. Il s'insère entre le réseau et la charge non linéaire. Les performances d'un filtre actif parallèle dépendent en grande partie du type de modulation mis en œuvre pour la commande des interrupteurs, du dimensionnement des éléments de couplage au réseau et du système de stockage (généralement capacitif), de la dynamique des algorithmes d'extraction et de contrôle des courants [38,39].

### 4.2-METHODE D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES

Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle [40]. La méthode de détection harmonique est la partie importante de FAP elle a la capacité de déterminer les attributs spécifiques des harmoniques (fréquence, amplitude, phase et le temps d'occurrence) à partir d'un signal d'entrée (qui peut être tension ou courant) en utilisant un algorithme mathématique particulier [41]. Il existe deux grandes approches qui ont émergé pour la détection harmonique, à savoir les méthodes dans le domaine temporel et les méthodes dans le domaine fréquentiel [42]. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante,
- Identification à partir de la détection du courant de la source,
- Identification à partir de la détection de la tension de la source.

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle [9].c'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans notre travail.

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles :

La première famille utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques de courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les

harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande capacité de calcul [43].

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total [44]. Dans ce chapitre on va présenter la commande du filtre actif, pour différentes méthodes d'identification des harmoniques à savoir : la méthode des puissances instantanées (pq).

#### **4.2.1-Identification dans le Domaine Fréquentiel :**

Parmi les méthodes d'identification les plus utilisées dans le domaine fréquentiel, nous pouvons citer :

- Transformée de Fourier rapide (FFT).
- Transformée de Fourier discrète (DFT).
- Transformée de Fourier discrète récursive (DFTR).

#### **4.2.2-Identification dans le Domaine Temporel :**

Le principe de la stratégie d'identification dans le domaine temporel est d'extraire par filtrage les harmoniques de tension ou de courant en temps réel, en séparant le fondamental des harmoniques. Cette technique utilise des formules algébriques faciles à implanter et réduit considérablement l'effort de calcul ; s'ajoute à cela le fait qu'elle permet d'identifier tous les harmoniques ; d'autre part elles sont largement utilisées pour le calcul de courant de référence [45]. Les algorithmes principalement utilisés dans le domaine temporel sont : la théorie de puissance instantanée active-réactive (pq) et la théorie du référentiel synchrone (dq), ainsi que la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr):

##### **4.2.2.1- Théorie de la puissance instantanée (pq)**

En 1983, Akagi et al, ont proposé «La théorie généralisée de la puissance réactive instantanée en circuits triphasés » également connu comme la théorie (pq). Elle est basée sur les valeurs instantanées dans les systèmes d'alimentation triphasés avec ou sans neutre, en plus elle est valable pour les opérations en régime permanent ou transitoire [46].

La théorie (pq) met en œuvre une transformation d'un système de référence stationnaire en coordonnées abc, à un système de coordonnées ( $\alpha, \beta$ ). Elle correspond à une transformation algébrique, connu sous le nom de la transformation de Clark, qui produit également un système de référence fixe, où les coordonnées ( $\alpha, \beta$ ) sont orthogonales les unes aux autres [47].

La transformation se fait à partir de la relation suivant :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

Si on applique cette relation sur le courant de charge et la tension de la source on trouve :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ia} \\ i_{Ib} \\ i_{Ic} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

Pour la puissance active et réactive dans le plan  $\alpha$ - $\beta$  il sera :

$$\begin{cases} P = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \\ Q = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \end{cases} \quad (4-3)$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés on trouve :

$$\begin{cases} P = V_{sa} I_{Ia} + V_{sb} I_{Ib} + V_{sc} I_{Ic} \\ Q = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb}) i_{Ic} + (V_{sb} - V_{sc}) i_{Ia} + (V_{sc} - V_{sa}) i_{Ib}] \end{cases} \quad (4-4)$$

On pose :

$$\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2 \quad (4-5)$$

Et à partir de l'expression (4.8) on a :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées  $p$  et  $q$  ont pour expression :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (4-7)$$

Avec

$\bar{p}, \bar{q}$  : Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.

$\tilde{p}, \tilde{q}$  : Puissance alternative liées à la somme des composantes harmoniques du courant. Pour l'extraction de puissance alternative on utilise la méthode de filtrage illustré sur la Figure 4.1.

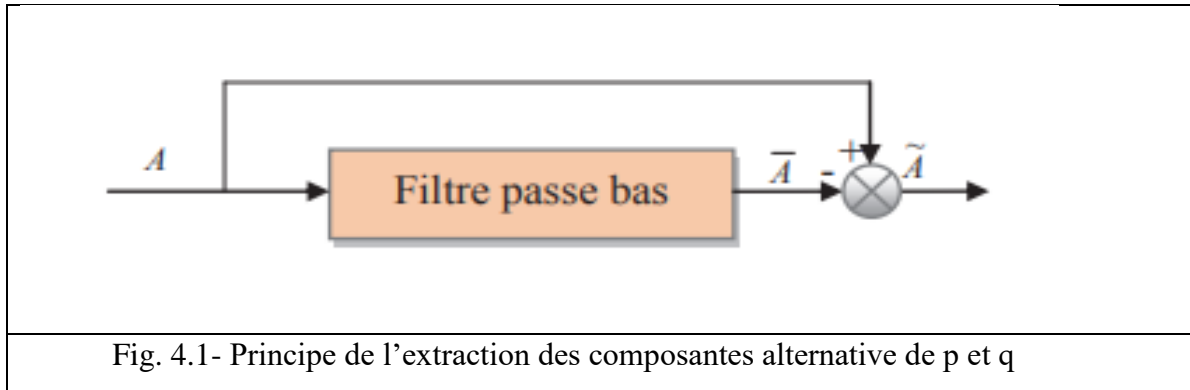


Fig. 4.1- Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q

On remplace (4.7) dans (4.6) on trouve :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

Donc le courant harmonique sera déterminé par la relation:

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} \quad (4-9)$$

Si on applique la transformation inverse de Clark on trouve :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{-1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

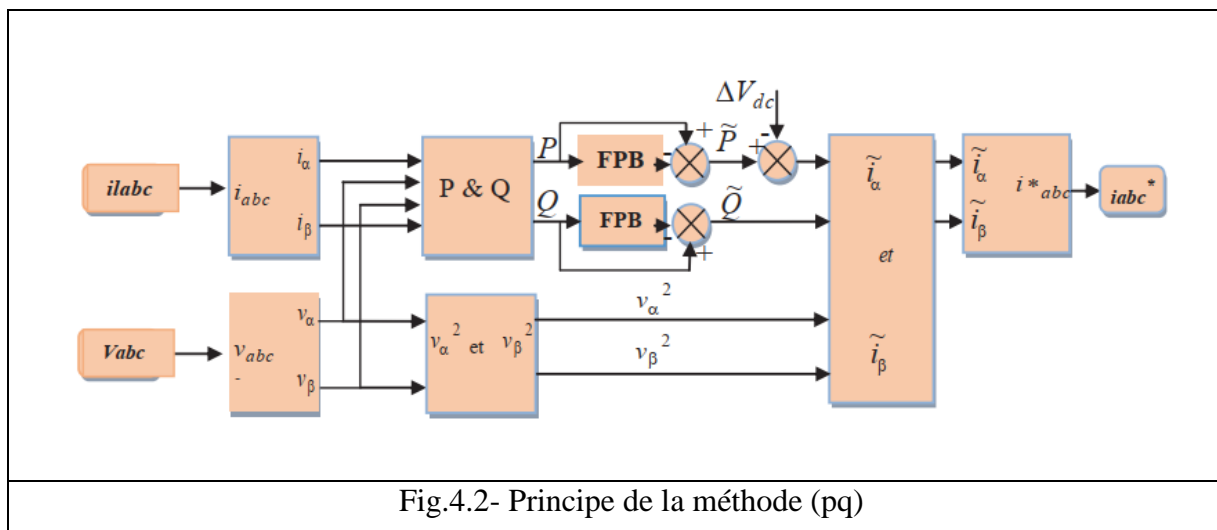


Fig.4.2- Principe de la méthode (pq)

### 4.3-Commandes des filtres actifs parallèles

La partie commande du filtre actif est constituée de trois modules distincts réalisant les fonctions suivantes :

- Détermination des courants harmoniques de la charge polluante ;
- Commande de l'onduleur du filtre actif ou poursuite des références de courant ;
- Régulation de la tension aux bornes de la source de tension continue.

### 4.4 -Stratégie de commande de l'onduleur du filtre active

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant).

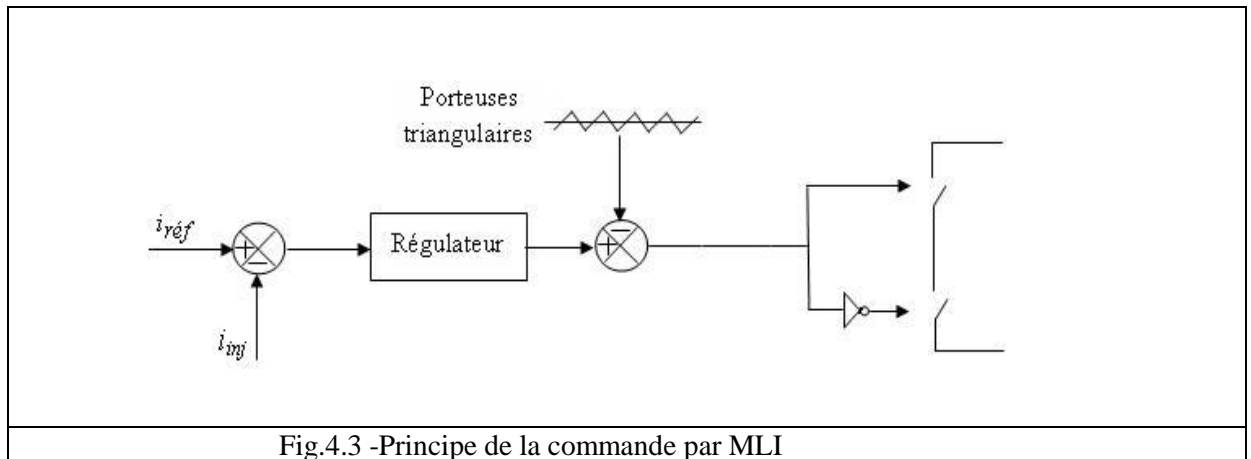
Deux types de commandes rapprochées des convertisseurs statiques sont principalement mis en œuvre : la commande par MLI et la commande par hystérésis. Dans ce paragraphe, nous présentons les modes de commande suivants [47] :

- MLI à échantillonnage naturel.
- Hystérésisconventionnelle.
- Hystérésis modulée.

#### 4.4.1-Contrôle par MLI

Le principe du contrôle par MLI est décrit à la figure 4.2. Dans ce cas, la différence entre le courant référence  $i$  et le courant réel  $i_f$  est appliquée à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire fixe donc la fréquence de découpage des semi-conducteurs de puissance.

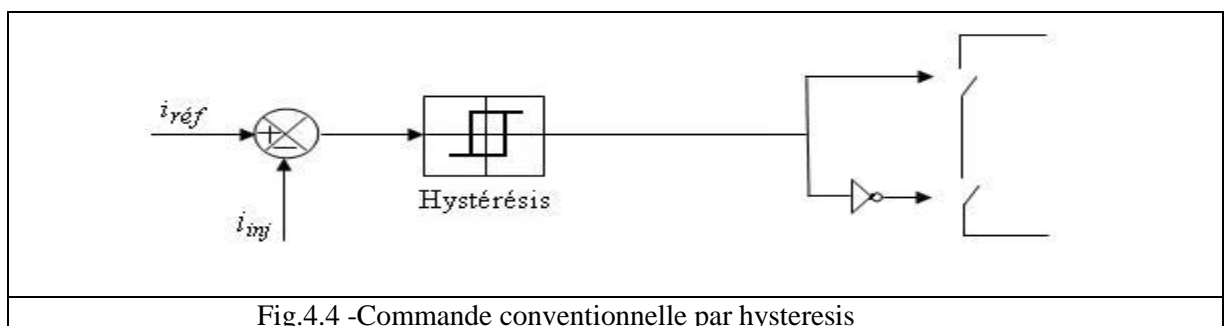




#### 4.4.2-Contrôle conventionnel par hystérésis

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure 4.3 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence  $i_f$  et le courant produit par l'onduleur  $i_f$

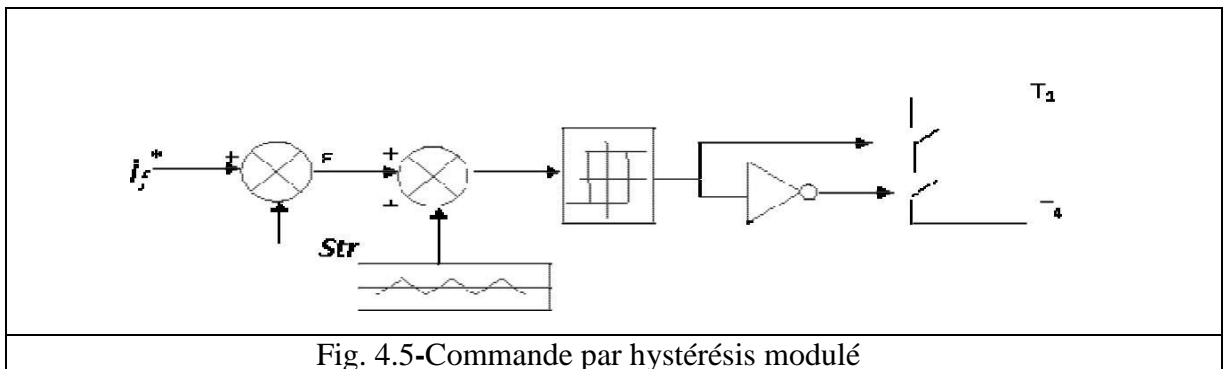
Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé : bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.



### 4.4.3-Contrôle par hystérésis modulée

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle en fixant la fréquence de commutation des semi-conducteur. Cette commande consiste à ajouter au signal d'erreur  $\mathcal{E} (\mathcal{E} = i_f^* - i_f)$

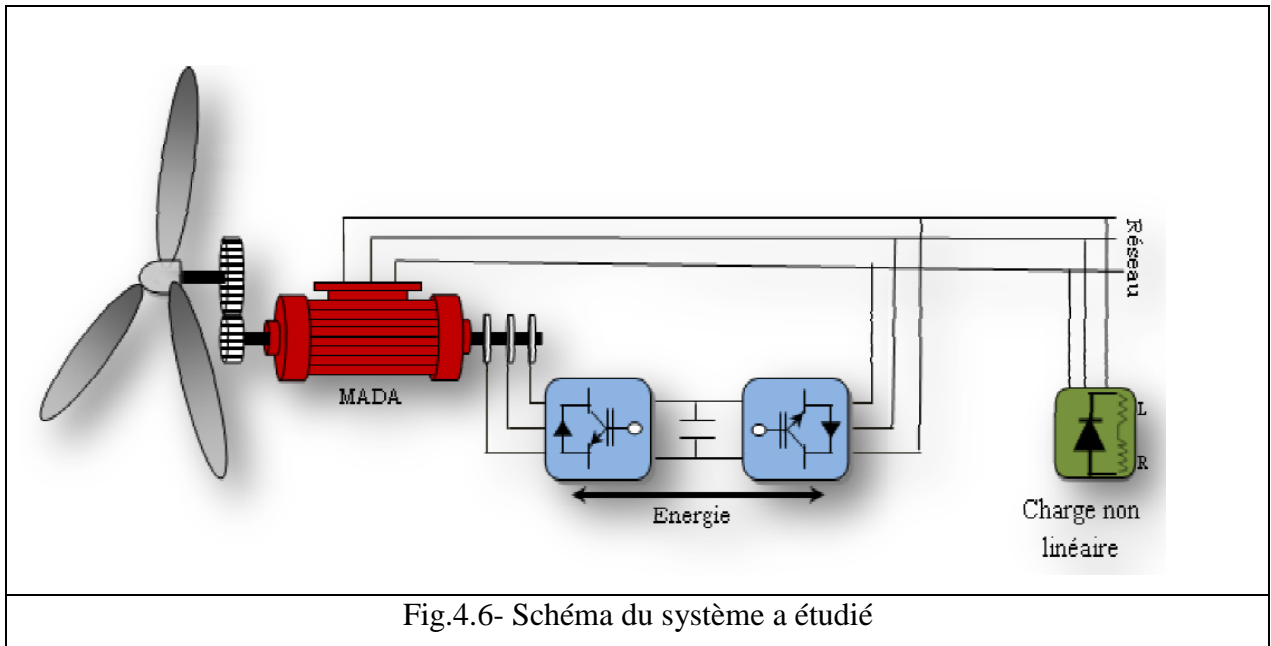
Triangulaire  $S_{tr}$  de fréquence  $f_{tr}$  et d'amplitude  $A_{tr}$ . La fréquence  $f_{tr}$  doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis de largeur de bande  $2B_h$  dont la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. Le schéma de cette commande est décrit à la ( fig 4.5.)



## 4.5-SIMULATION ET RESULTATS

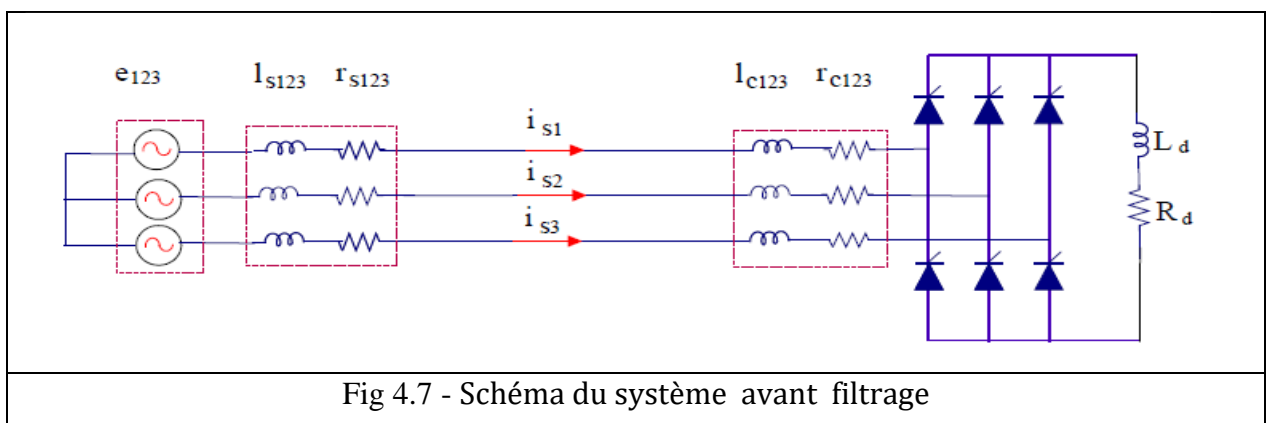
### 4.5.1-Description du système

L'ensemble de notre modèle est constitué par une source de tension éolienne alimente une charge polluante composée d'un redresseur triphasé débitant sur une charge  $Rd, Ld$ . Le réseau d'alimentation est assimilé à trois sources de tension sinusoïdale parfaite en série avec une inductance  $ls$  et une résistance  $rs$ . Une inductance additionnelle  $lc$  est connectée à l'entrée du redresseur afin de limiter les gradients  $di/dt$ . Nous nous sommes intéressés dans ce paragraphe à l'étude du système présenté sur la (Fig 4.6).



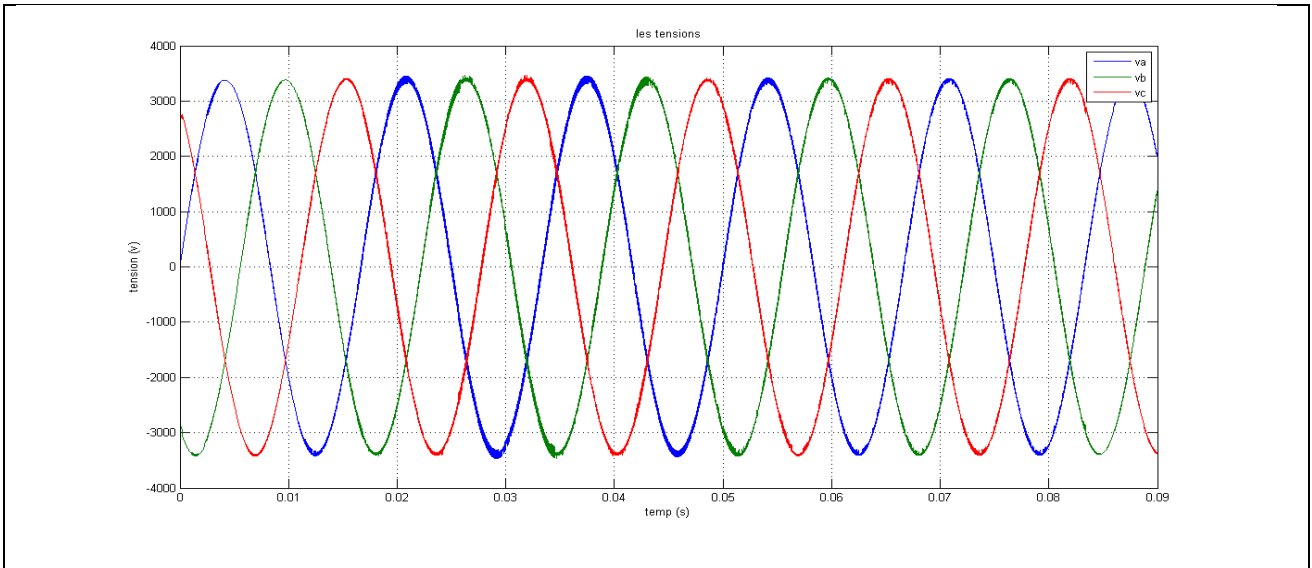
#### 4.5.2- Etude du système avant filtrage

Dans un premier temps, nous avons simulé le réseau électrique avec production éolienne et sa charge non linéaire (Figure 4.7), sans y connecter le filtre actif pour voir l'effet des harmoniques sur l'allure du courant absorbé (Figure 4.10).



On présente les résultats de simulation obtenus ci-dessous :

Paramètres de la charge non linéaire  $R=10\Omega, L=0.01H$ .



4.8- Les tensions de la source

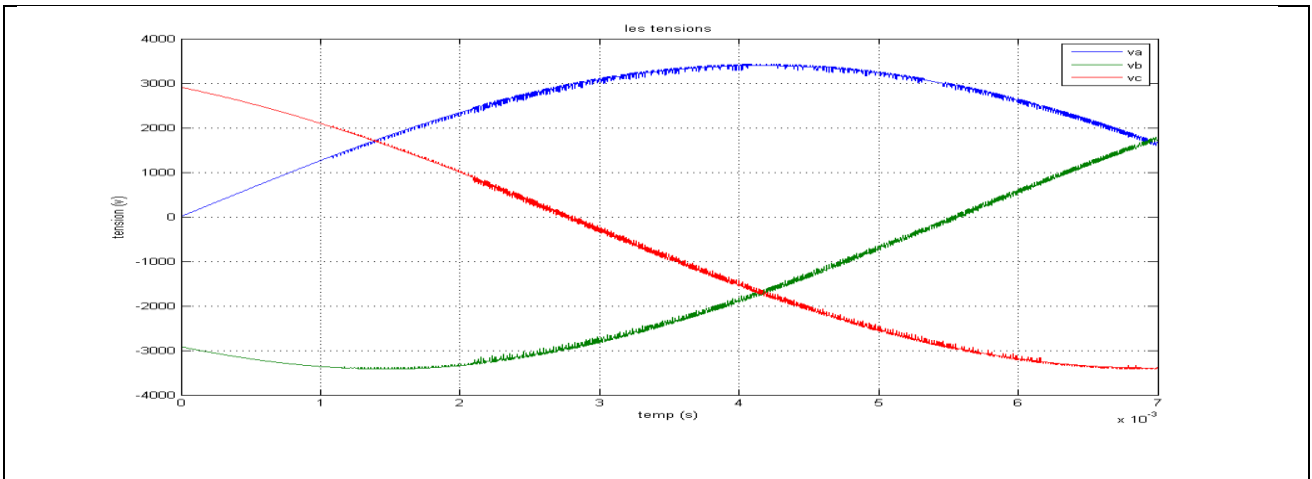


Fig.4.9- Zoom des tensions de la source

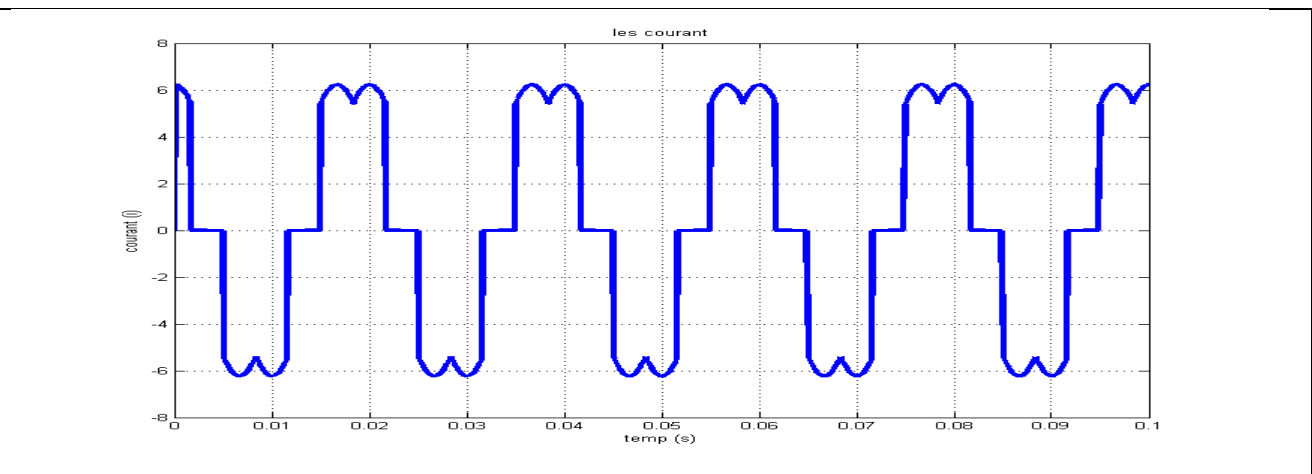


Fig.4.10-Courant de la charge non linéaire  $i_{ca}$

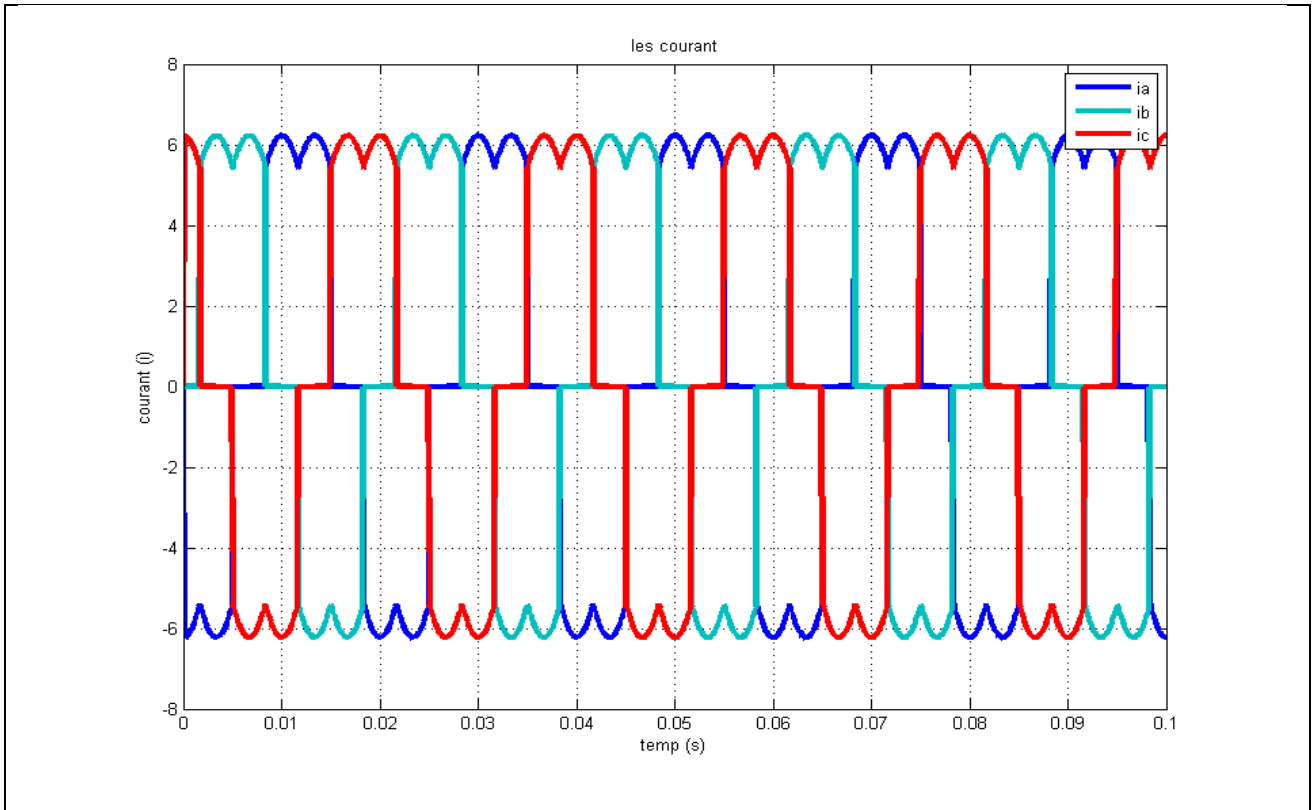


Fig. 4.11- Courant de la source avant filtrage

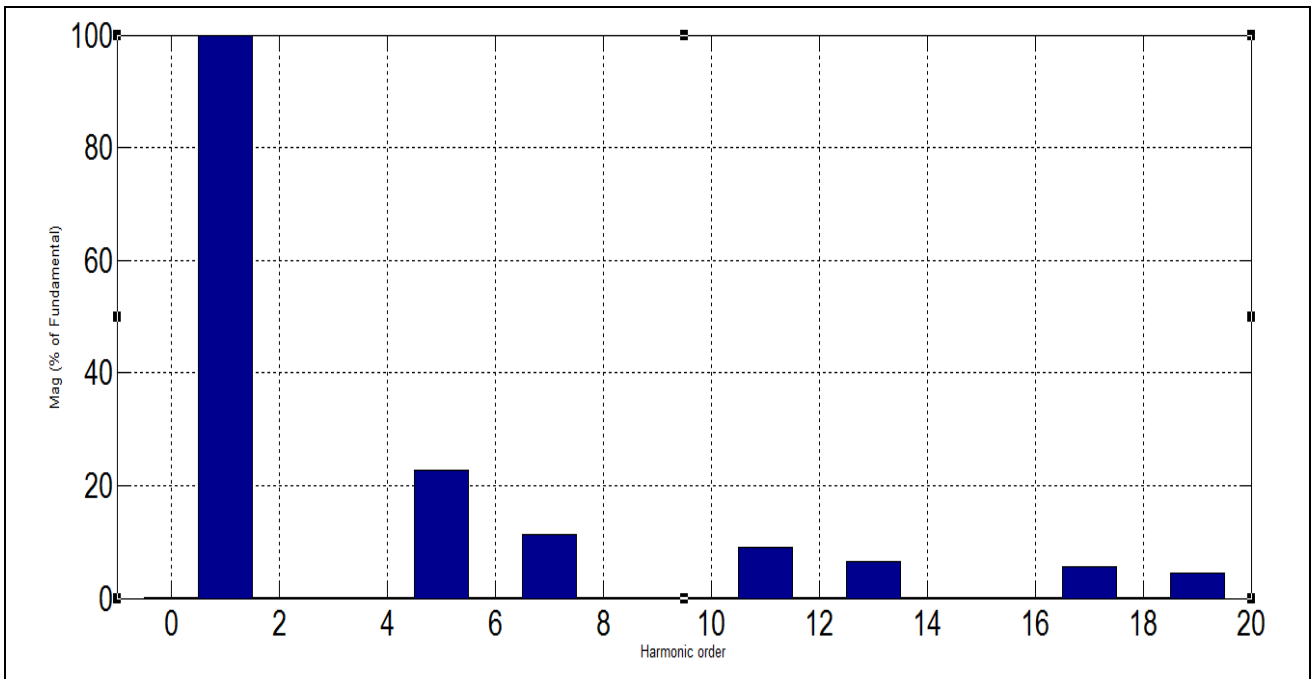


Fig.4.12-.Spectre harmonique du courant de la source.

### 4.5.3-Commentaire

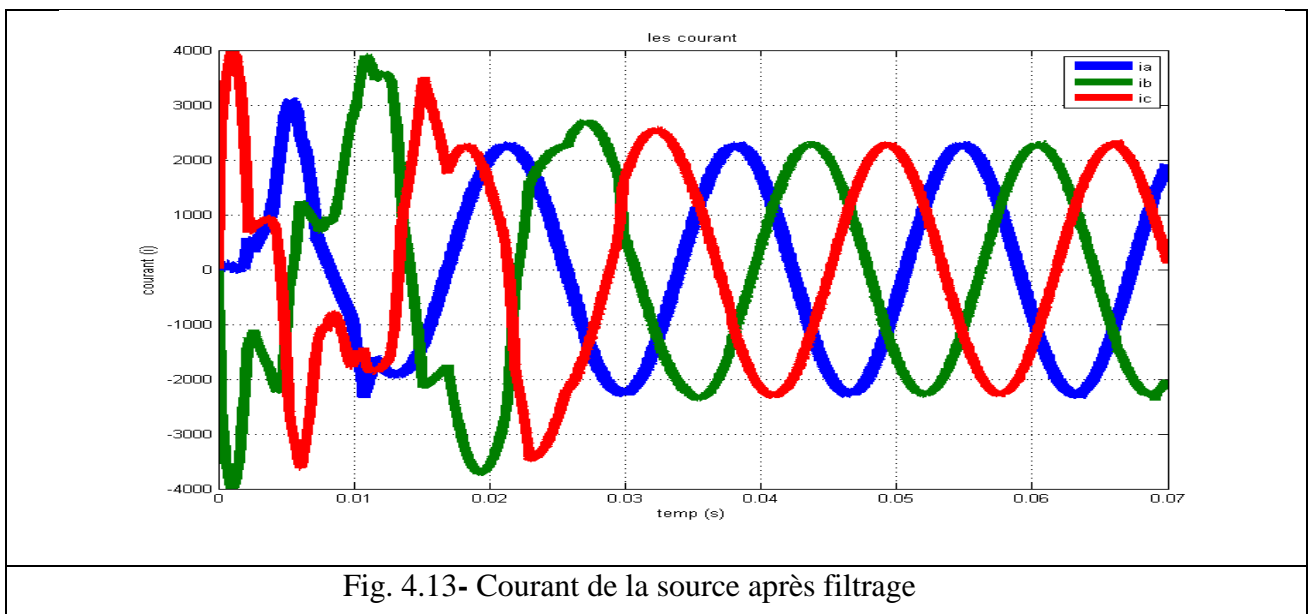
Les figures précédentes présentent le courant absorbé par la charge polluante de la première phase (Figure 4.9) et le courant de la source et son spectre harmonique (figures 4.10, 4.11). Le THD de courant pour cette charge est de 30.76% , on voit que les harmoniques les plus dominants sont ceux des rangs 5, 7 et 11, c'est le cas d'un redresseur triphasé alimentant une charge RL. Ce THD est calculé pour les vingt premiers harmoniques selon la « norme C.E.I ». Le but du filtrage actif est de ramener ce THD à une valeur inférieure à 5 %, comme l'impose la norme C.E.I.

Maintenant, nous allons présenter les résultats de simulation avec le filtre actif et pour les trois méthodes de contrôle présentées auparavant. On applique le filtrage sur le redresseur triphasé alimentant une charge R, L

### 4.5.4-Résultats après le filtrage

#### 4.5.4.1-Résultats de simulation dans le cas du contrôle par MLI

Les figures 4.13, 4.14 et 4.15 illustrent les résultats de simulation obtenus pour la commande par MLI (le courant de source de la phase a et son spectre harmonique et le courant injecté par le filtre). Le THD du courant de source est réduit à 2,21% après filtrage. Cette commande est décrite par le schéma de la figure 4.3 pour contrôler notre FAP, plus que cette commande offre une fréquence de commutation constante, elle donne un THD également satisfaisant, on a utilisé pour cela des porteuses triangulaires de fréquence 20kHz .



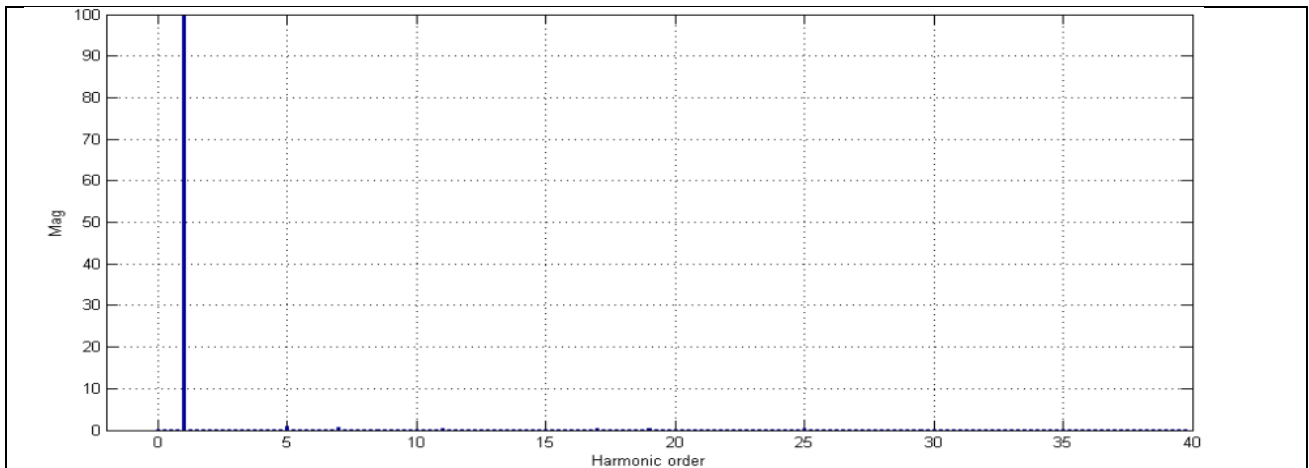


Fig. 4.14-Analyse harmonique du courant de source après filtrage

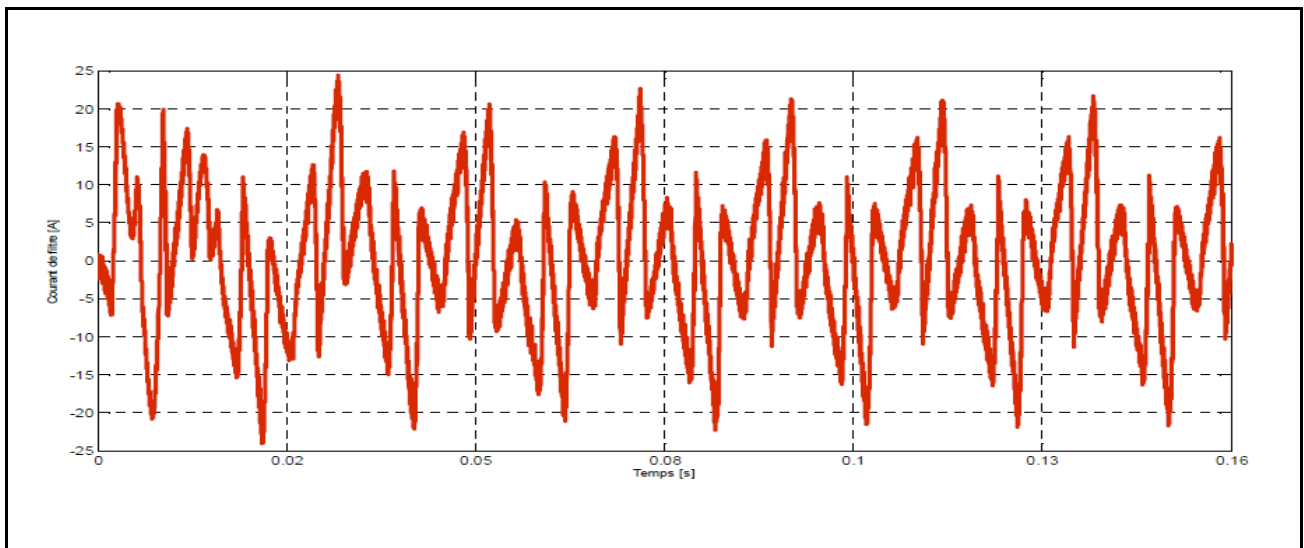


Fig. 4.15 -Courant injecté par le filtre actif

Les résultats obtenus montrent que la mise en œuvre d'un filtre actif permet de réduire considérablement le contenu harmonique du courant de source et sur une large plage fréquentielle. Ceci se traduit par la diminution du THD après filtrage bien en dessous de 5%. La technique MLI, facile à être utilisée, assure alors un fonctionnement à fréquence fixe et un contenu harmonique parfaitement réduit.

#### 4.5.4.2-Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis

Les figures suivantes 4.16, 4.17 et 4.18 illustrent les résultats de simulation obtenus pour la commande par hystérésis (le courant de source de la phase a et son spectre harmonique).

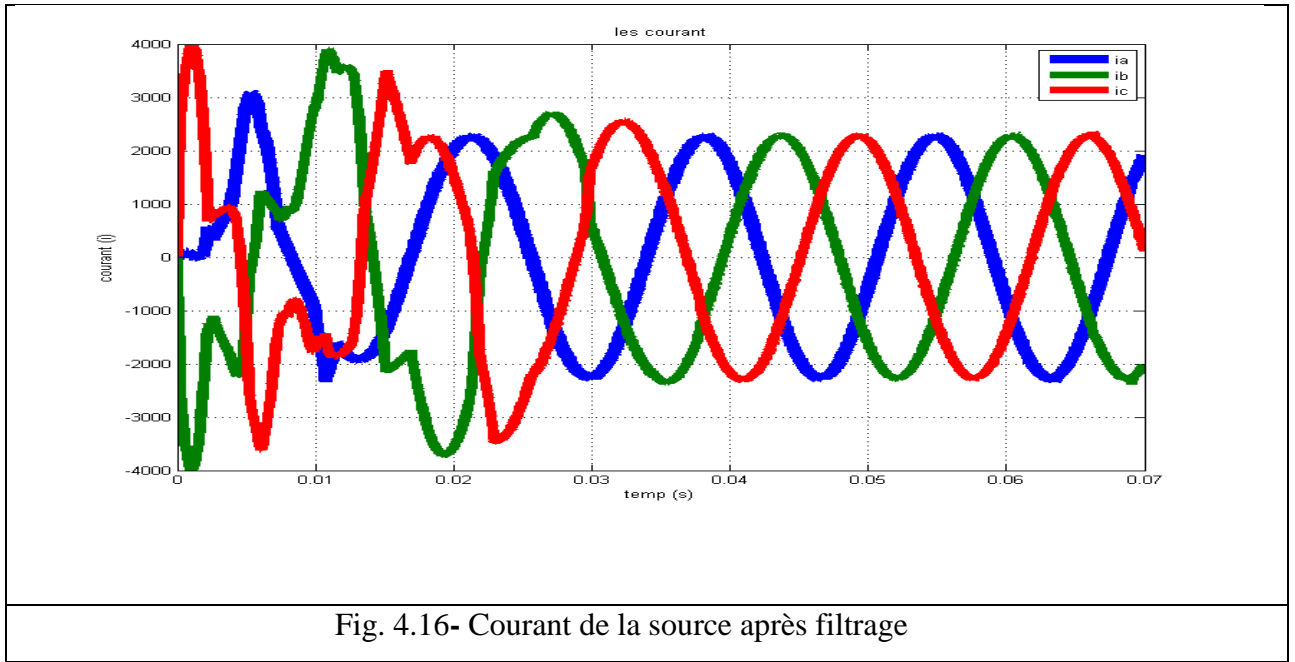


Fig. 4.16- Courant de la source après filtrage

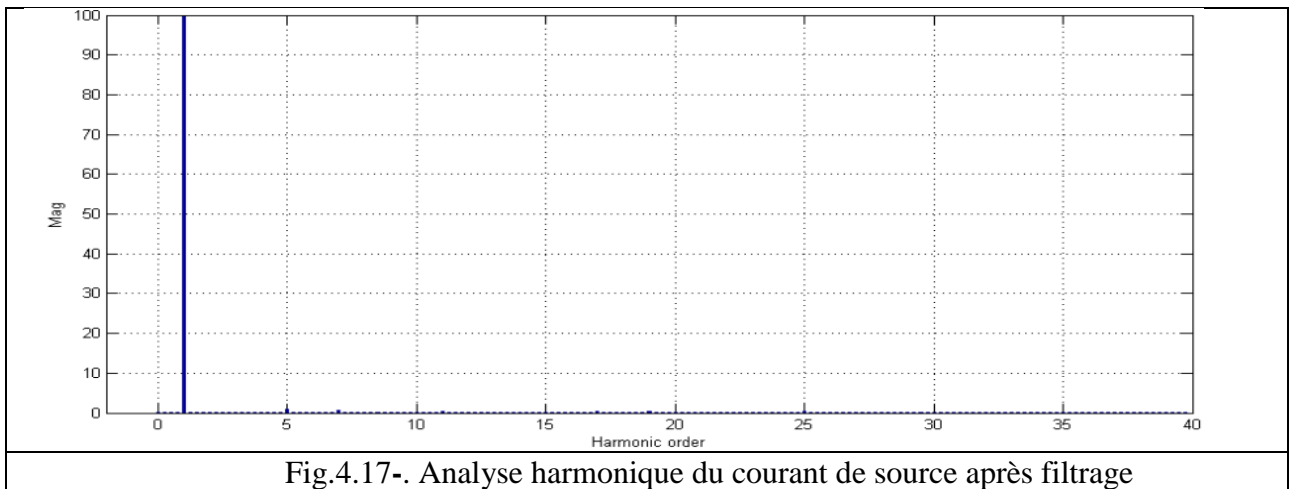


Fig.4.17-. Analyse harmonique du courant de source après filtrage

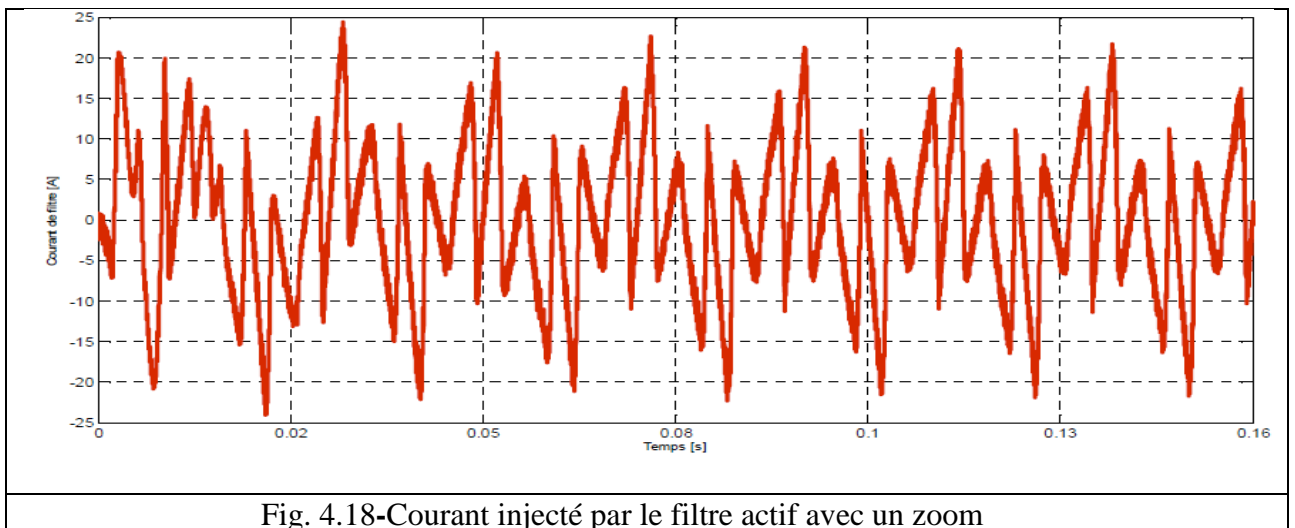


Fig. 4.18-Courant injecté par le filtre actif avec un zoom



Le THD du courant de la source est réduit à 2.43% après filtrage. Cependant, pour cette commande, la fréquence de commutation est variable. On note ici que ce THD est fortement lié à la bande d'hystérésis choisie ( $\pm 0.05A$ ), bien évidemment que cette bande soit très étroite. En général, une bande plus étroite entraîne une fréquence de commutation maximale plus élevée.

#### 4.5.4.3-Résultats de simulation dans le cas du contrôle par hystérésis modulée

Les figures 4.19, 4. 20 et 4.21 illustrent les résultats de simulation obtenus pour la commande par hystérésis (le courant de source de la phase a et son spectre harmonique). Le THD du courant de la source est réduit à 2.58% après filtrage. Ces résultats sont obtenus avec un signal triangulaire de bande d'hystérésis égale à ( $\pm 0.05A$ ) et de porteuses triangulaires de fréquence  $20kHz$ .

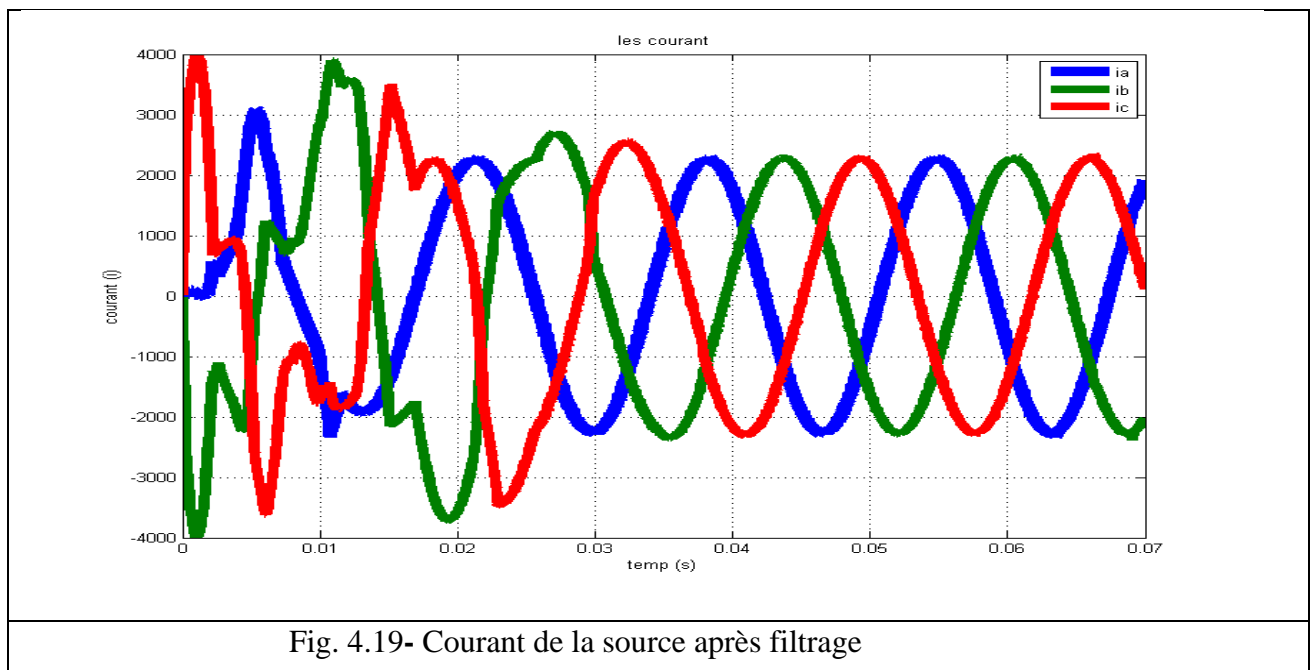
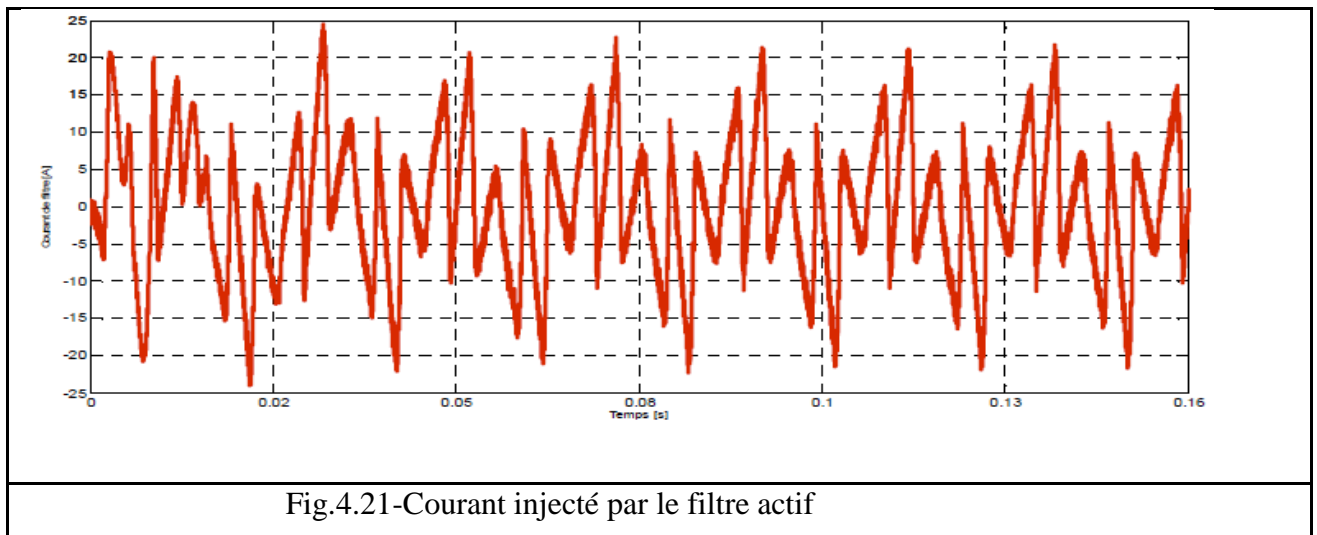
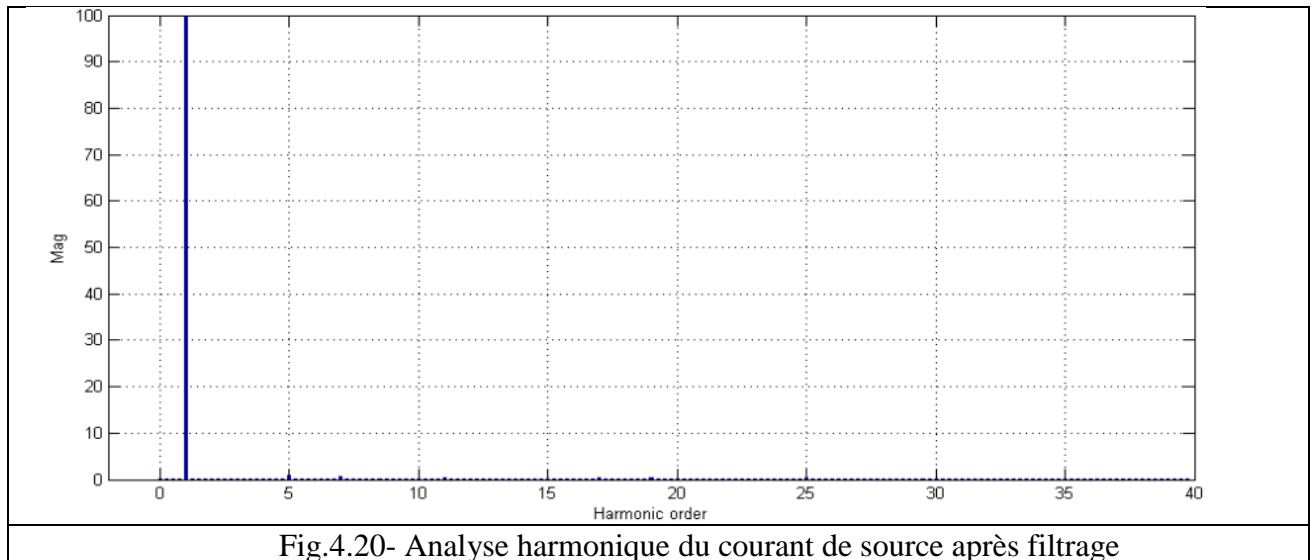


Fig. 4.19- Courant de la source après filtrage



Les résultats obtenus avec les trois méthodes de commande montrent que la mise en œuvre d'un filtre actif permet de réduire considérablement le contenu harmonique du courant de source et sur une large plage fréquentielle. Ceci se traduit par la diminution du THD après filtrage bien en dessous de 5%. On constate que le THD obtenu avec la commande MLI est inférieur à celui obtenu avec hystérésis et avec hystérésis modulé. Par contre, l'hystérésis conventionnelle, malgré sa simplicité, présente l'inconvénient d'une fréquence de commutation variable, La technique MLI, facile à être utilisée, assure alors un fonctionnement à fréquence fixe et un contenu harmonique parfaitement réduit.

#### 4.6-CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté la topologie de filtres actifs de puissance parallèle à structure tension destinées à compenser les harmoniques de courants générés par des charges non linéaires dans un réseau électrique triphasé avec une source de tension éolienne.

Nous avons présenté la méthode d'identification des courants de référence à savoir la méthode des puissances active et réactive instantanées. En ce qui concerne la poursuite des courants de référence, nous avons rappelé la technique principale de contrôle par MLI.

La suite du travail est réservée aux travaux de simulation numérique en utilisant le logiciel MATLAB- Simulink des différents modèles de FAP développés en fonction de la topologie du convertisseur utilisé, de la stratégie du contrôle adoptée et de la technique de contrôle des courants de référence appliquée. .

Les résultats de simulation montrent que les différents modèles de FAP proposés à base des deux stratégies de contrôle utilisées donnent des résultats très satisfaisants en matière de réduction du THD. Nous remarquons que quelle que soit la stratégie de commande utilisée, le filtre actif de puissance donne toujours de meilleurs résultats.

# CONCLUSION GENERALE

## 5 - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

### 5.1 – CONCLUSION

Les développements techniques et réglementaires au cours des dernières années dans le réseau électrique ont entraîné des exigences de plus en plus élevées pour les systèmes électroniques. Mais le besoin croissant de traiter automatiquement de doubler cet équipement, ce qui à son tour provoquer une pollution du réseau électrique. Ces polluants sont principalement produits par des charges non linéaires, et ce dernier repose sur des convertisseurs d'énergie qui fournissent de l'énergie sous de nombreuses formes et sont de plus en plus utilisés dans l'industrie.

L'une des solutions les plus efficaces pour corriger ces défauts est l'utilisation de filtres actifs parallèles conçus pour nettoyer la grille et compenser l'énergie interactive. Cela nous permet d'avoir un courant net semi-approximatif avec un facteur de puissance unitaire. Nous avons étudié dans cette thèse les problèmes de perturbations ou de distorsions harmoniques provoquées par des charges non linéaires reliées à un réseau électrique connecté à une source éolienne.

Cependant, l'augmentation constante du nombre d'électronique de puissance utilisée dans les systèmes électriques ne fait que souligner ces perturbations. En outre, les origines et les effets indésirables de ces troubles ont été discutés en plus de la présentation des normes applicables. Ces normes imposées, notamment, aux distributeurs d'énergie, permettent la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes stimule l'étude et le développement de méthodes efficaces de nettoyage des réseaux électriques, tels que les dispositifs de filtration actifs, et les objectifs de ce manuscrit.

Nous avons abordé le premier chapitre par introduire les différents types de perturbations qui affectent l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous l'avons vu, les harmoniques, les déséquilibres de courant et de tension, les fluctuations de tension et les creux de tension ont des effets négatifs sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller de la température élevée et la dégradation du processus à la destruction complète de cet équipement. En conséquence, les pannes de réseau possibles sont très probables.

Dans le deuxième chapitre on a discuté des nombreuses solutions de traitement traditionnelles et modernes. Une solution traditionnelle basée sur des filtres négatifs est généralement pénalisée en termes d'espace et de résonance. De plus, le filtre passif ne peut pas s'adapter aux changements dans le réseau et aux charges de contaminants.

Récemment, en plus de la filtration harmonique, des filtres actifs parallèles et série ont été conçus et synthétisés pour compenser tous les types de perturbations qui peuvent survenir dans un réseau de faible puissance. En effet, profitant des avancées de l'électronique énergétique, ces solutions peu encombrantes n'entraînent aucune résonance avec les éléments négatifs du réseau et font preuve d'une grande résilience face à l'évolution du réseau électrique et à la charge polluant. La structure de chaîne parallèle active est une solution complète pour compenser toutes les perturbations de courant et de tension.

D'autres solutions de traitement comprennent la combinaison de filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de la compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté la machine à vent, fournissant des informations générales sur son développement, son utilisation, les deux principales familles d'éoliennes, les différents composants des éoliennes à axe horizontal et les zones d'application. Ce troisième chapitre nous permettra de mieux identifier le générateur de turbine approprié pour un site à potentiel éolien.

Le dernier chapitre a permis de mettre en évidence les fonctions utiles à l'application de la filtration active, puis d'étudier le transducteur actif du filtre, connecté en parallèle au réseau de l'éolienne afin d'injecter des courants permettant d'éliminer la pollution harmonique des charges non linéaires. Ensuite, nous avons introduit trois types de contrôle de courant dans le filtre actif: le réglage de largeur d'impulsion ou le contrôle PWM, le contrôle traditionnel de sous-développement, et enfin la décélération modifiée.

## **5.2 - PERSPECTIVE**

Ce travail nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer la problématique riche en questions et perspectives qui feront l'objet de nos futures activités. En tant que prospects, nous travaillons actuellement à l'amélioration de nos résultats, en particulier ceux liés au filtre actif parallèle à trois niveaux.

Dans le future nous souhaitons aussi de :

- Prendre en considération les harmoniques dues à la source éolienne.
- Faire la même étude avec une MADA de forte puissance.
- Faire la même étude en utilisant un compensateur universel.

# **Rrferences bibliographiques**



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. DUFFEY, Christopher K. et STRATFORD, Ray P. Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1989, vol. 25, no 6, p. 1025-1034.
- [2]. BERMEO, Amaia Lopez De Heredia. "*Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension.*" 2006. Thèse de doctorat.  
Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [3]. CHELLI Zoubir "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique", thèse de doctorat
- [4]. BRUYANT, Nicolas. "*ETUDE ET COMMANDE GENERALISEES DE FILTRES ACTIFS PARALLELES. Compensation globale ou sélective des harmoniques. Régime équilibré ou déséquilibré.*" 1999. Thèse de doctorat.
- [5]. ALALI, Mohamad Alaa Eddin. "*Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension:(Automatisation des systèmes de puissance électriques)*". 2002. Thèse de doctorat. Strasbourg 1.
- [6]. M. Lebziz " Etude de la pollution harmonique dans les réseaux industriels " Séminaire GL1K, Zone Industrielle, Skikda, 2005.
- [7]. WIERDA, René. "Flicker ou scintillement des sources lumineuses". Cahier Technique Merlin Gerin CT176, 1995.
- [8]. FERRACCI, Philippe. "La qualité de l'énergie électrique". *Cahier technique*, 2001, no 199, p.13.
- [9]. COLLOMBET, C., LUPIN, J. M., et SCHONEK, J. "Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement", cahier technique n 152. *Schneider Electric*.
- harmoniques sur les réseaux industriels & tertiaires.1ière partie : Qualité de l'alimentation électrique
- [10]. Th. Deflandre & P. Murras, " La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels & tertiaires.1ière partie : Qualité de l'alimentation électrique", Les cahiers de l'ingénierie, Direction des Etudes & Recherche, Service Etudes de Réseaux, Département Postes & Lignes, EDF Industrie, France, 1997.

- [11]. Th. Deflandre & P. Mauraas, " La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels & tertiaires. 2eme partie : Solution, mise en oeuvre et étude de cas ", Les cahiers de l'ingénierie, Direction des Etudes & Recherche, Service Etudes de Réseaux, Département Postes & Lignes, EDF Industrie, France, 1997.
- [12]. J. Arrillaga, N. R Watson, " Power system quality assessment ", Nanyang Technological University Singapore, University of Canterbury, Christchurch, New Zeland, S Chen, 1985.
- [13]. ROUND, Simon D. et DUKE, Richard M."Active filter optimisation for efficient variable frequency remote generation." In : *Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record of the 1993 IEEE*. IEEE, 1993. p. 894-898.
- [14]. STRATFORD, Ray P. "Harmonic pollution on power systems-a change in philosophy". *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1980, no 5, p. 617-623.
- [15]. GOMBERT, Christophe. "*Simulation temps-réel des dispositifs d'électronique de puissance dédiés aux réseaux d'énergie électrique*". 2005. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [16]. PEJOVIC, Predrag et JANDA, Zarko. "An improved current injection network for three-phase high-power-factor rectifiers that apply the third harmonic current injection". *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2000, vol. 47, no 2, p. 497-499.
- [17]. AREDES, Mauricio, HEUMANN, Klemens, et WATANABE, Edson H. "An universal active power line conditioner. " *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1998, vol. 13, no 2, p. 545-551.
- [18]. FUJITA, Hideaki et AKAGI, Hirofumi. The unified power quality conditioner: "the integration of series and shunt-active filters". *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 1998, vol. 13, no 2, p. 315-322.
- [19]. FUJITA, Hideaki et AKAGI, Hirofumi. "A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters. " *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1991, vol. 27, no 6, p. 1020-1025.
- [20]. EL-HABROUK, M., DARWISH, M. K., et MEHTA, P. "Active power filters: A review". *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 2000, vol. 147, no 5, p. 403-413.

- [21]. CHENG, Po-Tai, BHATTACHARYA, Subhashish, et DIVAN, Deepak M. "Control of squarewave inverters in high-power hybrid active filter systems". *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1998, vol. 34, no 3, p. 458-472.
- [22]. DA SILVA, SA Oliveira, DONOSO-GARCIA, P., CORTIZO, Porfírio C., *et al.* "A lineinteractive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning for three-phase, four-wire systems". *International journal of electrical power & energy systems*, 2004, vol. 26, no 6, p. 399-411.
- [23]. DA SILVA, SA Oliveira, DONOSO-GARCIA, Pedro Francisco, CORTIZO, Porfírio cabaleiro, *et al.* "A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities". *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2002, vol. 38, no 6, p. 1581-1590.
- [24]. SHAFIEE KHOOR, Mohsen. "Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs: "série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques". 2006. Thèse de doctorat. Nantes.
- [25]. ZHANG, Yongchang, XIE, Wei, LI, Zhengxi, *et al.* "Model predictive direct power control of a PWM rectifier with duty cycle optimization. " *IEEE transactions on power electronics*, 2013, vol. 28, no 11, p. 5343-5351.
- [26]. SATYANARAYANA, G., PRASAD, K. N. V., KUMAR, G. Ranjith, *et al.* "Improvement of power quality by using hybrid fuzzy controlled based IPQC at various load conditions. " In : *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on*. IEEE, 2013. p. 1243-1250.
- [27]. WEN-XING, Wang et XUE-LING, Zhu. "Harmonic-Suppression System Based on Fuzzy Neural Control in Power Line. " In : *Information Engineering (ICIE), 2010 WASE International Conference on*. IEEE, 2010. p. 93-96.
- [28]. HADIOUCHE, Djafar, RAZIK, Hubert, et REZZOUG, Abderrezak. "On the modeling and design of dual-stator windings to minimize circulating harmonic currents for VSI fed AC machines. " *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 40, no 2, p. 506-515.
- [29]. Giuseppe Saccomando, I S., et Ambra Sannino, "Improving Voltage Disturbance Rejection for Variable-Speed Wind Turbines." *IEEE Transactions on energy conversion*, Volume 17, Issue 3, Page(s) : 422 - 428, Sept. 2002.
- [30]. M. BOUDIA Sidi Mohammed, "Optimisation de l'Évaluation Temporelle du

Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie", Mémoire de Doctorat de Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd dans 2011.

[31]. CHERFIA NAÏM, "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens "Mémoire de ingénieur de Université Mentouri Constantine, Algérie dans 07/06 / 2010.

[32]. Ackermann, T. (2005). "Wind Power in Power Systems, John Wiley et Sons, England".

[33]. MOUSSA SIDDO Abdoulaziz, "Etude du Générateur Asynchrone Pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne", Mémoire de ingénieur de Ecole Nationale Polytechnique dans 2007.

[34].kairouani dari" Intégration d'une éolienne Sur le réseau électrique isolé" thèse de master

[35]. ADAM, George, STAN, Alina G., et LIVINT, Gheorghe. A Matlab-Simulink "Approach To Shunt Active Power Filters". In : *ECMS*. 2011. p. 205-210.

[36]. ÖZDEMIR, Engin, KALE, Murat, et ÖZDEMIR, Şule. "Active Power Filter for Power Compensation Under Non-Ideal Mains Voltages. " In : *Proc. 11th Mediterranean Conference on Control and Automation, Rhodes, Grécia*. 2003.

[37]. J. L. Afonso, C. Couto, J. S. Martins, "Active Filters with Control Based on the p-q Theory", *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, vol. 47, n° 3, Set. 2000, p. 5-10.

[38]. MONTERO, María Isabel Milanés, CADAVAL, Enrique Romero, et GONZÁLEZ, Fermín Barrero. "Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems". *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2007, vol. 22, no 1, p. 229-236.

[39]. HOOSHMAND, Rahmat Allah et ESFAHANI, Mahdi Torabian. "A new combined method in active filter design for power quality improvement in power systems". *ISA transactions*, 2011, vol. 50, no 2, p. 150-158.

[40]. SENTHILNATHAN, N. et MANIGANDAN, T. "A Novel Control Strategy for Line Harmonic Reduction using Three Phase Shunt Active Filter with Balanced

- and Unbalanced Supply". *European Journal of Scientific Research*, 2012, vol. 67, no 3, p. 456-466.
- [41]. ASIMINOAEI, Lucian, BLAABJERG, Frede, et HANSEN, Steffan. "Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications". In : *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE. IEEE*, 2005. p. 635-641.
- [42]. SALAM, Zainal, TAN, Perng Cheng, et JUSOH, "Awang. Harmonics mitigation using active power filter: A technological review". *Elektrika*, 2006, vol. 8, no 2, p. 17-26.
- [43]. NAKAJIMA, T. et MASADA, E. "An active power filter with monitoring of harmonic spectrum". In : *EPE-89, 3rd European conference on power electronics and applications, Aachen, Germany*. 1989.
- [44]. BENCHAITA, Lahlali. "*Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle- commande*". 1998. Thèse de doctorat.
- [45]. DJEGHLOUD, Hind. "*Filtrage Actif de Puissance*". 2007. Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine.
- [46]. AKAGI, Hirofumi, KANAZAWA, Yoshihira, et NABAE, Akira. "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits". In : *IPEC*. 1983. p. 1375-1386.
- [47]. AKAGI, Hirofumi. "New trends in active filters for power conditioning". *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1996, vol. 32, no 6, p. 1312-1322