



**Mémoire de Projet de fin d'étude**

**Préparé par**

**EL HAJI BADIA**

**EZZAHIR NAWAL**

**Pour l'obtention du diplôme**

*Master Sciences et Techniques*

*Electronique, Signaux et Systèmes Automatisés*

*(E.S.S.A)*

**Intitulé**

**Analyse et simulation des caractéristiques de fluctuation de  
l'énergie éolienne et son impact sur le réseau électrique**

**Encadré par :**

**Pr T.LAMHAMDI**

**Mr ABOUBAKR EL MAKRINI (ONEE)**

**Soutenu le 13 Juin 2016, devant le jury composé de :**

**Pr T.LAMHAMDI**

**: Encadrant**

**Mr ABOUBAKR EL MAKRINI**

**: Encadrant (ONEE)**

**Pr HASSANE EL MARKHI**

**: Examineur**

**Pr H.ABARKAN**

**: Examineur**

## Dédicace

*Nous dédions ce travail,*

*Comme preuve de respect, de gratitude, et de reconnaissance :*

*A Nos très chers parents,*

*Pour tout l'amour qu'ils nous portent et pour leurs encouragements qu'ils nous ont apportés au cours de ce projet.*

*A Nos frères et sœurs,*

*Pour votre soutien et encouragements.*

*A tous Nos professeurs*

*Leur générosité et leur soutien nous oblige de leurs témoigner notre profond respect et loyale considération.*

*A Nos chers ami(e)s,*

*Pour les moments que nous avons passé ensemble veuillez trouver ici l'expression de notre gratitude.*

*A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

*Merci infiniment*

## **Remerciement :**

Nous tenons à exprimer notre parfaite gratitude et à témoigner notre reconnaissance à tous ceux qui ont été à l'origine de notre aide et assistance et tous ceux qui nous ont accueillis, soutenu et accompagné durant toute la période de notre stage.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Monsieur **ABOUBAKR EL MAKRINI**, Ingénieur d'Etat et Chef de la Division de transport à l'Office National d'Electricité, pour avoir accepté notre demande de stage, pour sa disponibilité, pour la confiance qu'il a su nous accorder et les conseils précieux qu'il nous a prodigués tout au long de la réalisation de ce projet.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à Monsieur **HASSANE EL MARKHI**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour son soutien, sa collaboration, ses remarques pertinentes et directives, et sa disponibilité.

Nous tenons à exprimer notre encadrant universitaire Monsieur **TIJANI LAMHAMDI**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Fès, pour son encadrement exemplaire ainsi que pour son soutien, sa collaboration, ses remarques pertinentes et directives, sa disponibilité, sa rigueur scientifique, son soutien sans faille et son expérience qui nous ont permis d'évoluer dans notre sujet et pour l'intérêt qu'il a porté à notre travail.

Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre modeste travail et pour toutes leurs remarques et critiques. Veuillez trouver ici le témoignage de notre respect le plus profond.

## **Abstract:**

Electricity has become increasingly vital to humanity. Given the demand for electricity growing nowadays, and away from the use of polluting fossil fuels (oil and gas); several countries have turned to renewable energy.

The new so-called green energy renewable 'reappeared and gradually takes an undeniable place in the electricity market. Of these, wind power currently appears prominently as extra energy. Today, the penetration of wind farms is becoming increasingly significant in the electrical network. Therefore, many problems of instability are generated upon connection of these farms to the grid saw the intermittent nature of this form of energy.

It is in this sense that registered our project of end of study is conducted within the national office of water and electricity spread over a period of four months. We were brought first to identify the different impacts of wind power on the transmission grid.

This identification allowed us second to focus on the harmonic fluctuations and flicker. After that we cited traditional and modern ways to remedy both problems. Then we choose to detail the active filter parallel (its structure, modeling and control strategy) as modern and adequate solution to compensate for the harmonic currents and the STATCOM device as a solution for maintaining stability and voltage control to an acceptable level to the network.

Finally, we simulated the wind farm TAZA to demonstrate the important role of the STATCOM device in the management of wind farms and attenuation rapid voltage fluctuations and then the active filter parallel who's the aim of improving the total harmonic content.

## Sommaire

Dédicace .....	1
Remerciement : .....	2
Abstract: .....	3
Introduction générale : .....	11
CHAPITRE I: APERÇU SUR L'ONEE ET LE PARC EOLIEN DE TAZA.....	13
I. Aperçu général sur l'ONEE .....	14
1. Historique .....	14
2. Missions de l'ONEE.....	14
3. Objectifs de L'ONEE.....	15
4. Stratégies.....	15
5. Activités de L'ONEE .....	15
6. L'organigramme de l'ONEE.....	17
II. Aperçu général sur le parc du TAZA .....	18
1. Programme intégré de l'énergie éolienne : .....	18
2. Projet De Parc Eolien De Taza (150 MW) .....	18
2.1. Fiche Technique du Parc : .....	18
2.2. Raccordement du parc : .....	19
CHAPITRE II: LES SYSTEMES EOLIENS A BASE DE LA MADA .....	21
Introduction.....	22
I. L'énergie éolienne .....	22
1. Définition de l'éolienne .....	22
2. Composition d'une éolienne .....	23
3. Les types de la turbine : .....	24
II. Les types de systèmes éoliens : .....	24
1. Les éoliennes à vitesse fixe : .....	25
2. Les éoliennes à vitesse variable : .....	25
2.1. Intérêt de la vitesse variable : .....	25
2.2. Les structures des éoliennes à vitesse variable.....	26
2.3. Caractéristique puissance-vitesse d'éoliennes de grandes puissances : .....	27
III. Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA).....	28
1. Définition : .....	28

2. Modes de fonctionnement :	28
IV. Situation énergétique au Maroc	29
1. Les Projets des éoliens	29
2. Les objectifs	29
Conclusion	30
CHAPITRE III : LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE : <i>les harmoniques et le flicker</i>	31
Introduction	32
I. Paramètres de la qualité de l'énergie électrique	32
1. Creux et coupures de tension	33
2. Déséquilibre du système triphasé de tension	33
3. Variation de fréquence	34
4. Fluctuations de tension	34
5. Harmoniques et inter-harmoniques	34
II. Les perturbations harmoniques :	35
1. Origine des harmoniques :	35
1.1. Emission en tension :	35
1.2. Emission en courant :	36
2. Conséquences des harmoniques	36
2.1. Effets instantanés :	36
2.2. Effets à terme :	37
3. Analyse des harmoniques :	37
3.1. Caractérisation d'un contenu harmonique pour un signal :	37
3.2. Expression de la valeur efficace :	38
3.3. Taux de distorsion harmonique THD (%)	38
3.4. Expression des puissances mises en jeux	39
III. Fluctuations de tension : Flicker	41
1. L'origine du flicker :	41
1.1 Flicker en fonctionnement continu :	41
1.2 Flicker lors des opérations de couplage :	41
2. Les conséquences :	43
3. Méthodologie de mesure de Flicker	43
3.1 Les indicateurs de la sévérité du flicker :	43

3.2	Les limites de Flicker : .....	44
3.3	Méthode de calcul analytique .....	44
3.4	Méthode statistique .....	45
IV.	Les solutions d'atténuation des fluctuations de tension et les harmoniques : .....	46
1.	Dépollution des harmoniques : .....	46
1.1	Solutions traditionnelles de dépollution : .....	46
1.2	Solutions modernes de dépollution: .....	47
2.	Atténuation des fluctuations de tension : .....	47
2.1	Augmentation de la puissance de court-circuit : .....	48
2.2	La Compensation de la puissance réactive : .....	48
	Conclusion : .....	51
	CHAPITRE IV : LE FILTRE ACTIF PARALLELE (FAP) ET LE COMPENSATEUR SYNCHRONE STATIQUE (STATCOM) .....	52
	Introduction.....	53
I.	Structure du Filtre Actif Parallèle : .....	53
1.	Etudes de la partie puissance : .....	54
1.1.	Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux : .....	54
1.2.	Système de stockage de l'énergie .....	56
1.3.	Filtre de sortie .....	56
2.	Etude de la partie commande : .....	56
2.1	Méthodes d'Identification des Harmoniques du FAP .....	56
2.2	Contrôleur des courants de référence.....	59
II.	Structure de base d'un STATCOM .....	60
1.	Principe de fonctionnement d'un STATCOM .....	60
2.	Modélisation du STATCOM .....	63
3.	Contrôle du STATCOM.....	64
3.1.	Détermination des Références:.....	65
3.2.	Méthode Watt-Var découplée : .....	65
	Conclusion : .....	67
	CHAPITRE V : .....	68
	LA SIMULATION DU FILTRE ACTIF PARALLELE / LE COMPENSATEUR SYNCHRONE PARALLELE.....	68
	Introduction : .....	69
I.	Simulation du système éolien: .....	69

1. Simulation du vent .....	69
2. Simulation de parc éolien en fonctionnement normal .....	70
II. La simulation des fluctuations des harmoniques .....	72
1. Le modèle de simulation : .....	72
2. La modélisation de filtre actif parallèle sous matlab simulink : .....	74
2.1. Génération des courants de référence : .....	75
2.2. Régulation des courants de référence : .....	77
2.3. Génération des signaux de commande : .....	78
3. Le modèle de simulation avec le FAP : .....	79
3.1. Dimensionnement des paramètres du système (réseau-filtre actif-charge polluante : ...	79
3.2. Les résultats de simulation : .....	82
III. La simulation des fluctuations de Tension « «FLICKER » .....	84
1. Calcul théorique du niveau d'émission de Flicker : .....	84
2. Le modèle de simulation : .....	85
3. La modélisation du STATCOM sous <i>matlab simulink</i> : .....	87
3.1. Transformation de Park : .....	88
3.2. Identification des courants Références : .....	89
3.3. Le contrôle par la méthode de watt var découplé : .....	91
3.4. La génération des signaux de commande par (PWM): .....	92
4. Le système étudié avec STATCOM : .....	93
4.1. Dimensionnement des paramètres du STATCOM : .....	93
4.2. Les résultats de la simulation : .....	95
Conclusion générale : .....	97
Annexe : .....	100

## Liste des figures

Figure 1 : l'organigramme de l'ONEE.....	17
Figure 2 : Schéma unifilaire de raccordement du parc éolien de TAZA.....	19
Figure 3 : Schéma de raccordement Du parc au réseau.....	20
Figure 4 : conversion de l'énergie cinétique du vent.....	22
Figure 5 : composition d'une éolienne.....	23
Figure 6 : Technologies d'éoliennes.....	24
Figure 7 : éolienne à couplage direct et à vitesse fixe.....	25
Figure 8 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique.....	25
Figure 9 : éolienne à couplage électronique par le stator.....	26
Figure 10 : éolienne à couplage électronique par le rotor.....	26
Figure 11 : Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne.....	27
Figure 12 : la MADA.....	28
Figure 13 : projets éoliens en développement.....	30
Figure 14 : creux et de coupure de tension.....	33
Figure 15 : le déséquilibre.....	33
Figure 16 : La variation de la fréquence.....	34
Figure 17 : Fluctuations de tension.....	34
Figure 18 : les harmoniques.....	35
Figure 19 : schéma d'une éolienne connectée au réseau.....	41
Figure 20 : Schéma équivalent du parc connecté au réseau.....	42
Figure 21 : Le principe du flickermètre.....	45
Figure 22: Circuit équivalent après l'insertion de la capacité.....	48
Figure 23 : la structure du SVC.....	49
Figure 24 : schéma équivalent du <i>statcom</i> .....	50
Figure 25 : Structure d'un filtre actif parallèle.....	53
Figure 26 : onduleur deux niveaux.....	54
Figure 27 : Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q.....	58
Figure 28 : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées.....	59
Figure 29 : Principe de commande des courants par MLI.....	60
Figure 30 : structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.....	61
Figure 31 : schéma du STATCOM couplé au réseau.....	61
Figure 32 : fonctionnement du STATCOM en mode capacitif et inductif.....	63
Figure 33 : schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau.....	63
Figure 34 : Identification des courants de référence.....	65
Figure 35 : schéma de régulation du STATCOM (watt-Var découplé).....	66
Figure 36 : Schéma global du contrôle par la méthode Watt-Var découplé.....	67
Figure 37 : la simulation du vent.....	69
Figure 38 : le modèle du parc éolien en fonctionnement normal.....	70
Figure 39 : la génératrice du parc éolien.....	70
Figure 40 : la simulation du parc éolien.....	71
Figure 41 : Le modèle du système simulé.....	72
Figure 42 : $V_{abc}$ et $I_{abc}$ au point PCC.....	72
Figure 43 : Allure de spectre harmonique de $V_{abc}$ au PCC en fonctionnement nominal.....	73

Figure 44 : Allure de spectre harmonique $I_{abc}$ au PCC en fonctionnement nominal .....	73
Figure 45 : la modélisation de filtre actif parallèle sous MATLAB.....	74
Figure 46 : Génération des courants de référence .....	75
Figure 47 : conversion du système triphasé en système biphasé (a) .....	75
Figure 48 : La conversion du système triphasé en système biphasé (b).....	76
Figure 49 : La génération des puissances liées aux harmoniques .....	76
Figure 50 : La génération des courants $I_{\alpha^*}$ et $I_{\beta^*}$ .....	77
Figure 51 : Génération des courants de référence .....	77
Figure 52 : la régulation des courants de référence .....	77
Figure 53 : le principe de fonctionnement de régulateur PI .....	78
Figure 54 : la génération des signaux de commande.....	78
Figure 55 : le principe de fonctionnement de PWM .....	78
Figure 56 : Le modèle de simulation avec le FAP .....	79
Figure 57 : $V_{abc}$ et $I_{abc}$ au point PCC.....	82
Figure 58 : le spectre harmonique de $V_{abc}$ du (parc+FAP) au PCC .....	83
Figure 59 : le spectre harmonique de $I_{abc}$ du (parc+FAP) au PCC .....	83
Figure 61 : Le modèle du système avec le Flickermètre .....	85
Figure 62: $V_{abc}$ et $I_{abc}$ au point PCC.....	86
Figure 63 : les valeurs de sévérités d'une phase au point de raccordement.....	86
Figure 64: structure de Base du STATCOM.....	87
Figure 65: Bloc de Commande.....	88
Figure 66: Transformation de Park ( $V_{dq}$ , $I_{dq}$ ) .....	88
Figure 67 : la transformation de Park de Tension .....	89
Figure 68: courants Références ( $I_{d\_ref}$ , $I_{q\_ref}$ ).....	90
Figure 69 : la puissance $P_{ref}$ / la puissance $Q_{ref}$ .....	90
Figure 70: Contrôle par la méthode de watt var découplé.....	91
Figure 71 : La génération des impulsions pour le STATCOM .....	92
Figure 72 : Le Parc + STATCOM.....	93
Figure 73 : Les résultats de la simulation (Parc+STATCOM).....	95
Figure 74 : les valeurs de sévérités d'une phase au point de raccordement la présence de STATCOM	96

## Liste des Tableaux

Tableau 1 : Fiche technique du parc éolien .....	18
Tableau 2 : Taux de distorsion harmonique en tension .....	39
Tableau 3 : les limites de <b>Flicker</b> .....	44
Tableau 4 : Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux .....	55
Tableau 5 : l'émission du flicker en fonctionnement normal.....	84
Tableau 6 : l'émission du flicker dans le cas de renforcement .....	85

## Listes des Acronymes et Symbole

ONEE	: Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable
CEI	: Commission Electrotechnique Internationale
MADA	: Machine Asynchrone A Double Alimentation
THD	: Total Harmonic Distorsion
<i>Pst</i>	: Flicker à Court Terme (short time)
Plt	: Flicker à Long Terme (long time)
PCC	: Point Commun de Raccordement
MOSFET	: Transistor à Effet de Champ à Grille Isolée
GTO	: Gate Turn-Off Thyristor (Thyristors Commandés à l'Ouverture)
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor Bipolaire à Grille Isolée)
FAP	: Filtre Actif Parallèle
FAS	: Filtre Actif Série
UPQC	: Unified Power Quality Conditioner
SCC	: Puissance de Court-Circuit
PI	: Proportionnel-Intégral
FACTS	: Flexible Alternative Currents Transmission Systems
SVC	: Static VAR Compensator
STATCOM	: Static Synchronous Compensator
TSC	: Thyristor Switched Capacitors
TCR	: Thyristor Controlled Reactors
PLL	: Boucle à verrouillage de phase
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsion

## Introduction générale :

L'accélération du développement économique et social du Maroc a engendré une progression significative de la demande en Energie.

Pour répondre à ses besoins énergétiques croissants, le Maroc a défini une nouvelle stratégie énergétique visant à sécuriser l'approvisionnement en énergie et à en optimiser l'accès, tout en rationalisant la consommation et en protégeant l'environnement.

Dans ce contexte, les énergies renouvelables sont alors une composante majeure de la nouvelle stratégie énergétique du royaume. En effet, le Maroc dispose d'un potentiel important en énergies renouvelables dont l'exploitation permettra de couvrir une part substantielle de ses besoins croissants et de contribuer à la protection de l'environnement en se substituant aux énergies fossiles. L'éolien apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire puisque le vent est une source d'énergie libre, propre et inépuisable.

La connexion des éoliennes au réseau électrique pose un problème de stabilité du réseau électrique et la qualité de la puissance produite. Parmi les perturbations résultantes de la connexion de ces éoliennes on trouve les harmoniques et les fluctuations de tension « FLICKER ».

Pour réduire ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, deux solutions sont prises en compte :

- ✓ la première solution consiste à utiliser un filtre actif de puissance s'est largement développée cette dernière décennie. Ce filtre actif parallèle est un onduleur de tension ou de courant qui injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase. Nos travaux portent sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques et de la commande de l'onduleur.
- ✓ La deuxième solution c'est l'utilisation d'un compensateur statique STATCOM qui permet d'améliorer la stabilité des réseaux électriques et accroître la puissance de transport des lignes.

Dans ce contexte, ce rapport traite des différents aspects concernant la qualité de l'énergie électrique. Nous examinons les perturbations affectant la qualité de l'onde, plus précisément les harmoniques et le flicker et les principaux moyens de remèdes. Nous développons des algorithmes et stratégies de commande des dispositifs de mitigation. Le travail présenté comporte Cinq chapitres organisés comme suit :

- ⇒ Dans le premier chapitre, nous présentons l'office national de l'électricité aussi le parc éolien de TAZA.

- ⇒ Au second chapitre, sera consacré aux notions générales sur l'énergie éolienne. Les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés. Ensuite, les différentes machines électriques utilisées pour la conversion éolienne seront étudiées afin de montrer les avantages de la MADA.
- ⇒ Dans le troisième chapitre, nous abordons en premier lieu les différents problèmes affectant la qualité de l'énergie électrique. Nous focalisons le point sur celui des harmoniques, et le flicker. Ensuite nous passons aux moyens de luttés et les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique aussi que pour les fluctuations de flicker.
- ⇒ Dans le quatrième chapitre, nous décrivons en premier lieu la structure du filtre actif parallèle à deux niveaux, sa modélisation et sa stratégie de commande et contrôle générale, par laquelle a été divisé en deux parties: la partie puissance et la partie contrôle-commande. Ensuite, en deuxième lieu, nous décrivons la structure de STATCOM, son principe de fonctionnement, sa modélisation et stratégie de contrôle à partir de la méthode Watt-Var découplée.
- ⇒ Dans le cinquième chapitre, sera consacré à la simulation du parc éolien avec l'intégration du filtre actif, pour but d'améliorer le contenu total d'harmonique (THD). Ensuite, nous abordons la simulation du parc éolien avec l'intégration du STATCOM pour but d'éliminer les fluctuations rapides de tension 'le flicker'.
- ⇒ Enfin, notre travail sera clôturé par une conclusion et quelques perspectives.

# CHAPITRE I: APERÇU SUR L'ONEE ET LE PARC EOLIEN DE TAZA

---

## Chapitre I: Aperçu sur l'ONEE et Le parc éolien de Taza

### I. Aperçu général sur l'ONEE

#### 1. Historique

Crée par Dahir en août 1963 l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable a été substitué à la Société Electrique du Maroc pour prendre en main le secteur électrique : production, transport et distribution. C'est un établissement public ayant un caractère industriel et commercial et possédant une autonomie financière.

Les droits et obligations de l'ONEE sont définis dans un cahier de charges approuvé par décret en 1974, qui indique les conditions techniques, administratives et financières relatives à l'exploitation des ouvrages de production, de transport et de distribution de l'électricité.

Les ouvrages de production dont dispose l'ONEE, sont constitués de 24 usines hydroélectriques totalisant une puissance installée de 1 283.8MW, de 5 centrales thermiques vapeurs totalisant 2 385MW, de 7 centrales à turbines à gaz et plusieurs centrales Diesel totalisant 1093.7MW et un parc éolien de 250.4MW.

Le réseau de transport, reliant les moyens de production aux centres de consommation, qui couvre une très grande partie de territoire national, est constitué de lignes 400KV, 225KV, 150KV et 60KV d'une longueur totale de l'ordre 17107 KM environ. Il est par ailleurs interconnecté avec le réseau algérien au moyen de deux lignes 225KV et une ligne de 400KV et avec le réseau espagnol au moyen de trois lignes de 400kv sous-marins.

La coordination de gestion de l'ensemble du réseau de l'ONEE est assurée à partir des:

- Réseaux de distribution de l'ONEE sont constitués de près de 36955 KM en moyenne tension et de 92 130 KM en basse tension. L'énergie électrique est distribuée par l'ONEE en zone rurale et dans plusieurs centres urbains.
- Régimes municipaux ou intercommunaux, placées sous la tutelle du Ministère de l'intérieur pour les grands centres urbains. Le Dispatching national, implanté à Casablanca est doté de moyens modernes permettant une surveillance permanente et une exploitation optimale.

#### 2. Missions de l'ONEE

Les principales missions de l'ONEE consistent à :

- \* Gérer et développer le réseau du transport.
- \* Répondre aux besoins du pays en énergie électrique.

- \* Planifier, intensifier et généraliser l'extension et l'électrification rurale.
- \* Œuvrer pour la promotion et le développement des énergies renouvelables.

### 3. Objectifs de L'ONEE

Les principaux objectifs de l'ONEE consistent à :

- \* Couvrir dans les meilleures conditions techniques et économiques la progression de la demande d'énergie. Réduire les tarifs moyens et hautes tensions pour atteindre des prix concurrentiels au Maroc.
- \* Assurer directement ou indirectement la couverture financière de programmes d'investissements de plus en plus lourds et indispensables au développement de l'économie de pays.

Devant la volonté de désengagement de l'état d'autre part, l'ONEE s'oriente vers l'approche qui consiste à avoir recours aux producteurs concessionnaires privés, à la coopération par les interconnexions des réseaux avec des puissances garanties.

### 4. Stratégies

Pour satisfaire la demande d'énergie électrique au moindre coût et avec une meilleure qualité de service, l'ONEE a mis en œuvre une stratégie visant à renforcer son rôle de vecteur important de développement :

- La recherche du kWh le moins cher ;
- La diversification des sources d'approvisionnement ;
- La mise en valeur des ressources nationales ;
- L'intégration régionale.

### 5. Activités de L'ONEE

L'ONEE opère dans les trois métiers-clés du secteur de l'électricité : la **production**, le **transport** et la **distribution**.

- **La production :**

En tant que producteur, l'ONEE a la responsabilité de fournir sur tout territoire national et à tout instant une énergie de qualité dans les meilleures conditions économiques. Il assure cette fourniture par les moyens de production qu'il exploite directement ainsi que par les ouvrages qu'il a confiés à des opérateurs privés dans le cadre de contrats de production concessionnaire.

Au-delà de la gestion technique et de l'amélioration des ouvrages de son parc de production, l'ONEE développe de nouveaux moyens de production et de nouvelles technologies en conciliant performance économique, expertise technique, modélisation des ressources énergétiques nationales notamment les énergies renouvelables et préservation de l'environnement.

➤ **Potentiel d'énergies renouvelables:**

**Solaire:** Un rayonnement moyen de 5 kWh/m<sup>2</sup>/j.

**Eolien:** Un potentiel éolien de plus de 6000 MW

**Petite Hydraulique :** Un potentiel significatif pour les microcentrales hydrauliques : plus de 200 sites exploitables.

**Biomasse :** 9 millions d'hectares de forêt.

• **Transport**

Ayant pour mission d'assurer le transport de l'énergie électrique et la sécurité d'alimentation du pays, l'ONEE développe et renforce son réseau de transport qui couvre la quasi-totalité du territoire national. D'une longueur totale de 20 350 km en 2009, le réseau de transport national est interconnecté aux réseaux électriques espagnol et algérien, dans l'objectif de :

- ❖ *Renforcer la fiabilité et la sécurité d'alimentation.*
- ❖ *Bénéficier de l'économie potentielle sur le prix de revient dukWh.*
- ❖ *Intégrer le marché électrique national dans un vaste marché euromaghrébin.*

Avec le renforcement des interconnexions, le Maroc est devenu un carrefour énergétique entre les deux rives de la Méditerranée et offre l'infrastructure de base à l'émergence d'un véritable marché de l'électricité. Pour répondre aux besoins du pays en énergie électrique, l'ONEE a lancé un vaste programme de développement du réseau national de transport et de mise en place de véritables " autoroutes de l'électricité " vers les pays voisins.

Ce programme comprend :

- ❖ *L'extension et le renforcement des lignes 400 kV, 225 kV et 60 kV.*
- ❖ *Un nouveau dispatching national, (DOS), pour assurer une meilleure gestion technico-économique des moyens de production et de transport.*
- ❖ *La mise en place de la télégestion des centrales.*

• **Distribution**

La satisfaction de la clientèle et le service public constituent deux axes prioritaires de l'ONEE qui œuvre sans cesse pour l'amélioration de la qualité de service tant au niveau Technique que commercial

• **Eclairage public**

L'ONEE poursuit sa politique visant l'encouragement des Communes à opter pour la gestion déléguée du service d'éclairage public en confiant ce service à l'ONEE ou à des opérateurs spécialisés. Les objectifs étant d'encourager l'utilisation d'équipements moins énergétivores pour l'éclairage public, la rationalisation de la consommation d'énergie électrique dédiée à cette utilisation et à la systématisation de l'entretien des installations.

A ce jour, l'ONEE assure la gestion de l'éclairage public dans les villes d'Al HOCEIMA, BENI MELLAL, BENSLIMANE, BOUARFA, CHEFCHOUANE, ESSAOUIRA, IMZOUREN, KHEMISSET, KHROUBIGA, NADOR, TANGER, TAZA et quelques quartiers du Grand CASABLANCA.

### 6. L'organigramme de l'ONEE

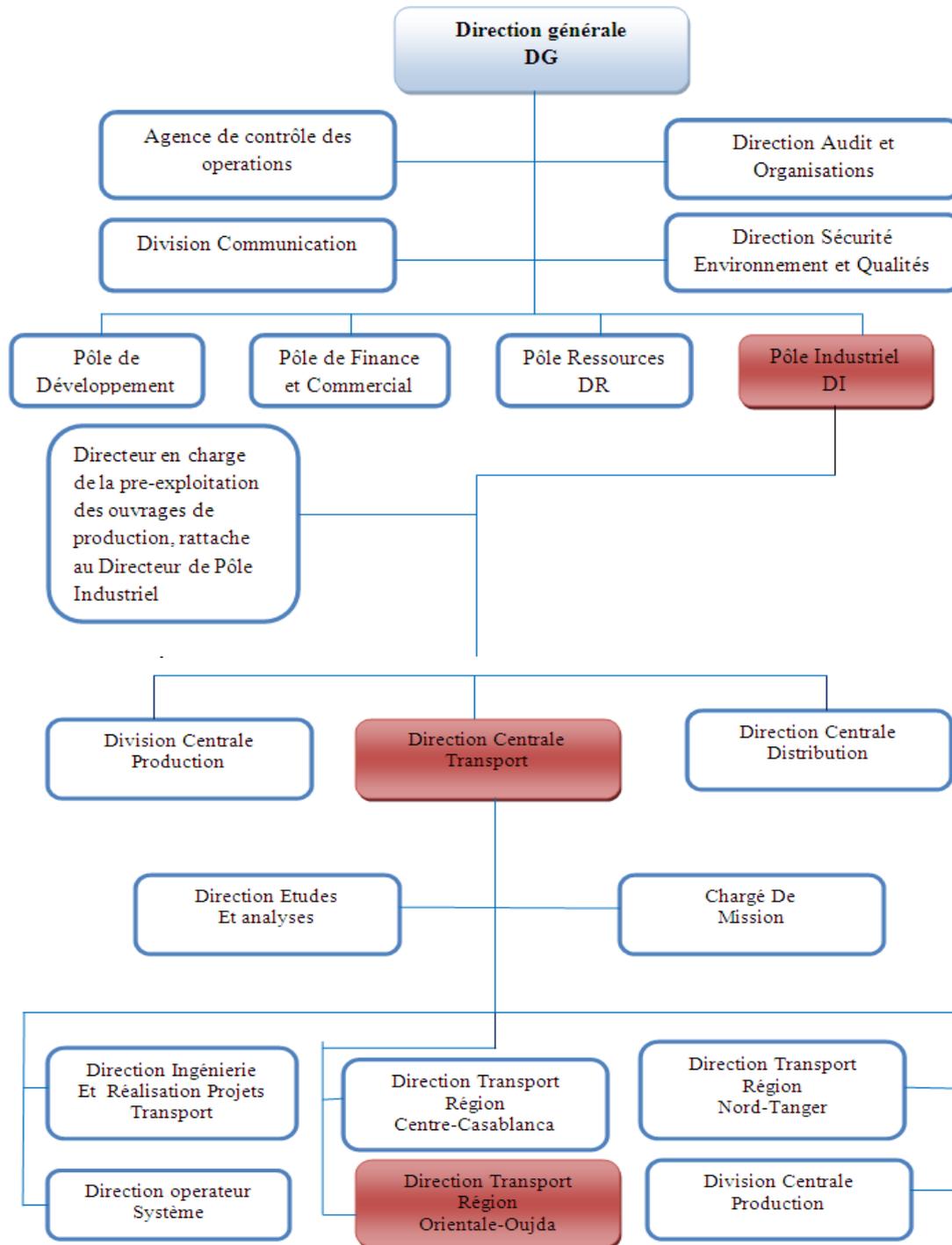


Figure 1 : l'organigramme de l'ONEE

## II. Aperçu général sur le parc du TAZA

### 1. Programme intégré de l'énergie éolienne :

Le programme intégré de l'Energie Eolienne 1000 MW est composé de six parcs éoliens, répartis dans les régions sud et nord du Royaume qui disposent d'un potentiel éolien important: Taza (150MW), Tanger II (100MW), *Boujdour* (100MW), *Tiskrad* (300MW), Midelt (150MW) et Jbel Lahdid (200MW).

Ce programme entre dans le cadre de la stratégie énergétique visant, notamment, à atteindre une part de 42% des énergies renouvelables dans le bouquet électrique à l'horizon 2020, avec une composante éolienne de 2000 MW.

Outre la production d'une électricité verte, ce Programme vise, dans un cadre de partenariat public- privé, la promotion d'une industrie éolienne nationale.

Pour la réalisation du Programme, l'ONEE, le Fonds Hassan II pour le Développement Economique et Social et la Société d'Investissements Energétiques (SIE) s'associeront à un ou plusieurs partenaires stratégiques de référence dans les domaines de la production d'électricité et de l'industrie éolienne, qui seront retenus à l'issue des appels d'offres associés au Programme.

La totalité du programme sera opérationnelle en 2020.

Ce Programme est réparti en deux phases :

- ⊙ **1ère Phase** : Projet du Parc Eolien de Taza (150 MW), dont la mise en service est prévue début 2016 ;
- ⊙ **2ème Phase** : Projet Eolien Intégré 850 MW, composé de cinq parcs éoliens, répartis entre les régions sud et nord du Royaume qui disposent d'un potentiel éolien important : Tanger II (100MW), *Boujdour* (100MW), *Tiskrad* (300MW), *Midelt* (150MW), et Jbel Lahdid (200MW).

Les mises en service de ces parcs éoliens seront opérées entre 2016 et 2020.

### 2. Projet De Parc Eolien De Taza (150 MW)

#### 2.1. Fiche Technique du Parc :

<b>Situation géographique</b>	<b>Site <i>Touahar</i>, situé à 15Km de la ville de Taza</b>		
<b>Nombre d'éoliennes</b>	50	10 éoliennes	ECO 100
		40 éoliennes	ECO 110
<b>Vitesse moyenne annuelle du vent</b>	ECO 100	10 m/s	
	ECO 110	8.5 m/s	
<b>Vitesse minimale pour la production d'électricité</b>	3 m/s		
<b>Puissance totale du parc</b>	150 MW		

Tableau 1 : Fiche technique du parc éolien

## 2.2. Raccordement du parc :

- Raccordement interne :

Les éoliennes produisent du courant à une tension d'environ 690 V. Le courant passe ensuite par un transformateur situé à l'intérieur de la base de l'éolienne, et ressort à une tension nominale de 20 kV.

Les machines seront regroupées en grappes de 4 à 6 éoliennes reliées entre elles par un réseau 20 KV sous terrain. Les transformateurs 690 V/20 KV seront installés au niveau des nacelles, les cellules de protection et les transformateurs auxiliaires aux pieds des mats. Les grappes seront reliées au poste d'évacuation 20/225 KV par des liaisons sous terraines suivant les différents chemins d'accès.

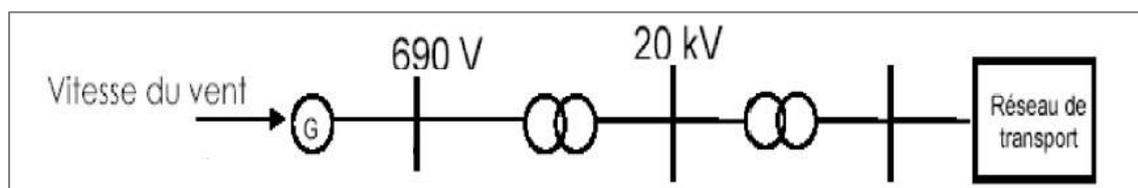


Figure 2 : Schéma unifilaire de raccordement du parc éolien de TAZA

- Poste d'évacuation 20/225 kV :

Un poste d'évacuation 20/225 kV sera installé au centre du parc (dans la vallée). Il collectera l'électricité produite par les éoliennes, transportée par le réseau de câblage inter-éoliennes, et la transmettra au réseau électrique national. Le poste d'évacuation sera lié au réseau ONEE en coupure d'accès sur la ligne 225 KV en conducteur ACR SR 288 mm<sup>2</sup>.

- Raccordement au réseau électrique :

D'après l'étude de raccordement qui a été effectuée, le raccordement du parc éolien au réseau national se fera par le rabattement de la ligne 225 kV El Ouali - Taza n°25.114 (située au Sud du parc) sur le nouveau poste 225 KV du parc. Cela implique la réalisation d'une ligne 225 kV à double terre, d'une longueur d'environ 5 km.

Le schéma de raccordement du parc au réseau:

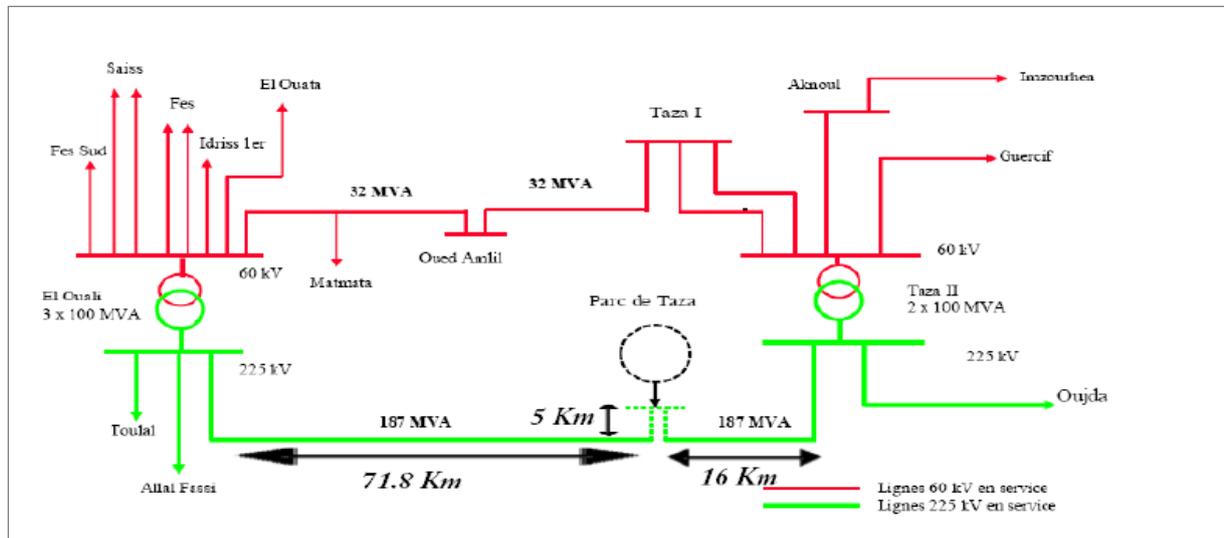


Figure 3 : Schéma de raccordement Du parc au réseau

Les puissances de court-circuit :

- Parc : 1800MVA
- El Ouali : 3000MVA
- TAZA : 1000MVA

## CHAPITRE II: LES SYSTEMES EOLIENS A BASE DE LA MADA

---

## Chapitre II: les systèmes éoliens à base de la MADA

### Introduction

Les systèmes éoliens transforment l'énergie cinétique du vent en énergie électrique à travers des aérogénérateurs. Les générateurs éoliens peuvent être connectés au réseau individuellement ou ils peuvent être groupés pour former des parcs éoliens. La plage de puissances des systèmes éoliens varie entre quelques  $kW$ s (systèmes mini éoliens) jusqu'aux installations de quelques  $MW$ s (grands systèmes éoliens). La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique.

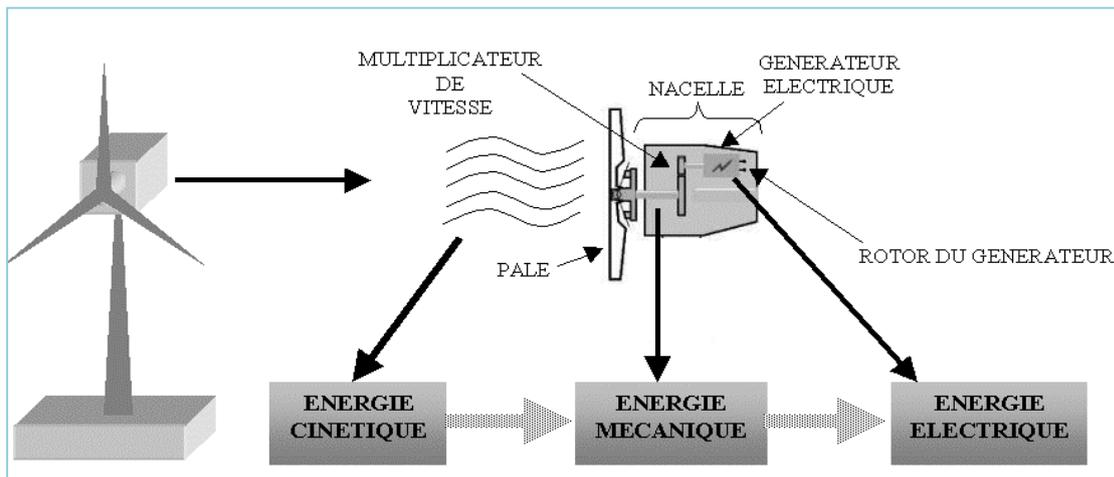


Figure 4 : conversion de l'énergie cinétique du vent

## I. L'énergie éolienne

### 1. Définition de l'éolienne

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. [1]

Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- Un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associé à l'électronique de commande).

## 2. Composition d'une éolienne

Il y a plusieurs types d'éoliennes, plus ou moins grandes, avec des pales de différentes tailles et donc des rendements différents. Cependant toutes les éoliennes sont composées des mêmes éléments : [1]

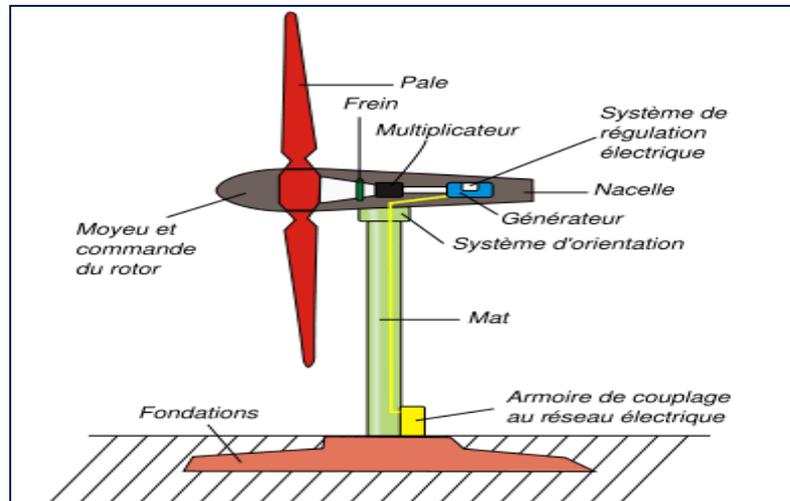


Figure 5 : composition d'une éolienne

- \* **Les fondations** : elles permettent la fixation du mât ; c'est sur elles que repose le poids de l'éolienne.
- \* **L'armoire de couplage au réseau électrique** : elle est généralement située au pied de l'éolienne et on trouve à l'intérieur les armoires électriques qui contrôlent le fonctionnement de l'éolienne et son rattachement au réseau électrique.
- \* **Le mât** : il permet d'accéder à la nacelle et sert au passage de câbles électriques, reliés à l'armoire de couplage au réseau électrique. Plus le mât est grand plus l'éolienne dispose d'une vitesse élevée et constante.
- \* **Le système d'orientation** : il supporte la nacelle et permet de l'orienter afin que les pales soit dans le sens du vent.
- \* **Les pales** : éléments moteur de l'éolienne qui convertissent la force du vent en énergie mécanique. Le nombre de pales est le plus souvent de trois pour une question de stabilité.
- \* **Le moyeu et commande du rotor** : il permet de faire pivoter les pales pour un meilleur rendement en fonction de la force du vent.
- \* **La nacelle** : composée elle même de plusieurs parties :
  - le rotor possède un système de torsion qui permet d'orienter les pales pour moduler la prise de vent et ainsi permettre à l'éolienne de tourner toujours à peu près à la même vitesse, c'est-à-dire entre 19 et 30 tours par minute.
  - le multiplicateur de vitesse permet d'augmenter la vitesse de rotation. On passe de 19 à 30 tours par minute à environ 1500 tours par minute.

- le frein à disque limite la vitesse et bloque la rotation en cas de vent trop fort ou pour la maintenance.
- le générateur permet la conversion de l'énergie mécanique apportée par la rotation des pales en énergie électrique. Son fonctionnement est le même qu'une dynamo qu'on retrouve sur les vélos et qui permet de faire briller une lampe.

### 3. Les types de la turbine :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal : [1]

- \* **les turbines éoliennes à axe horizontal :** Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité.
- \* **les turbines éoliennes à axe vertical :** Ce sont les éoliennes les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent.

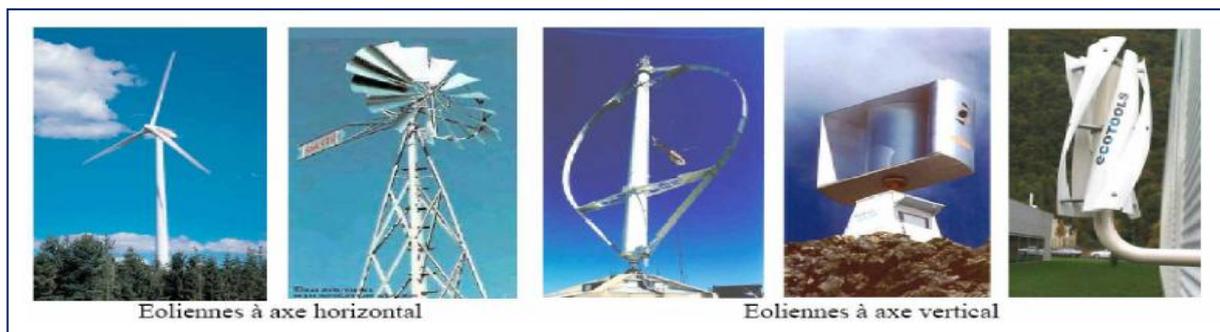


Figure 6 : Technologies d'éoliennes

Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation. Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

## II. Les types de systèmes éoliens :

En fonction de la génératrice, il existe actuellement trois principaux types de systèmes éoliens: système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage (Figure 7), système éolien à vitesse variable avec machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants (Figure 8), et système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation (Figure 9). [2]

## 1. Les éoliennes à vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à savoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, sa vitesse est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de pôles de la génératrice.

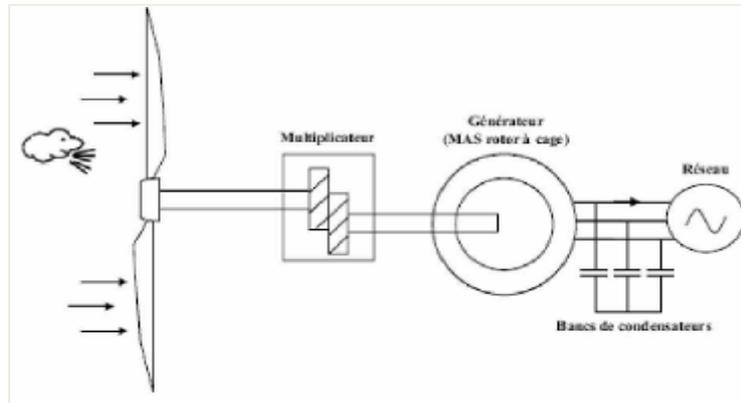


Figure 7 : éolienne à couplage direct et à vitesse fixe

On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables. Le multiplicateur permet d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à la fréquence électrique souhaitée. Par conséquent, la vitesse de rotation de la turbine est pratiquement fixée pour n'importe quelle vitesse du vent. C'est pour cette raison que cette structure correspond à un générateur éolien à vitesse fixe. Un générateur asynchrone à cage consomme toujours de la puissance réactive. Cette énergie réactive est indésirable et est généralement compensée en partie ou entièrement par des bancs de condensateurs ou autres compensateurs de réactif.

## 2. Les éoliennes à vitesse variable :

Les éoliennes à vitesse variable sont les plus utilisées pour la production d'énergie électrique. En effet, ces dernières contrairement aux éoliennes à vitesse fixe, fonctionnent sur une large plage de vitesses permettant ainsi une maximisation des puissances extraites pour des faibles vitesses du vent et le maintien d'une puissance constante pour des vitesses de vent élevées.

### 2.1. Intérêt de la vitesse variable :

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure :

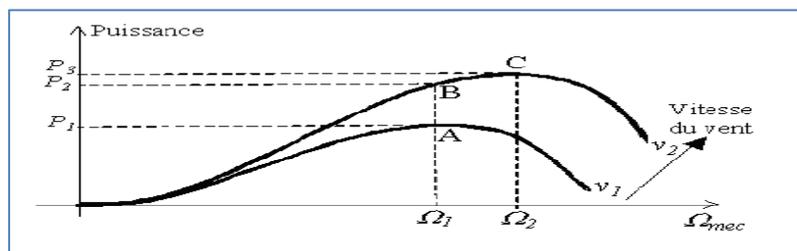


Figure 8 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique

Pour une vitesse de vent  $V_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$ , on obtient une puissance nominale  $P_1$  (point A). Si la vitesse du vent passe de  $V_1$  à  $V_2$ , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance  $P_2$  se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). la puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure à  $\Omega_2$ . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

## 2.2. Les structures des éoliennes à vitesse variable

Il existe deux structures des éoliennes à vitesse variable:

- la première configuration est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au rotor de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.

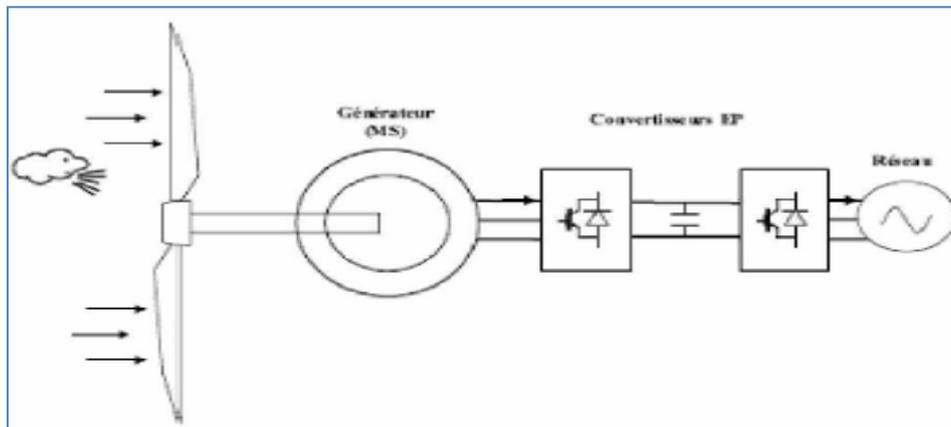


Figure 9 : éolienne à couplage électronique par le stator

- la deuxième configuration est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

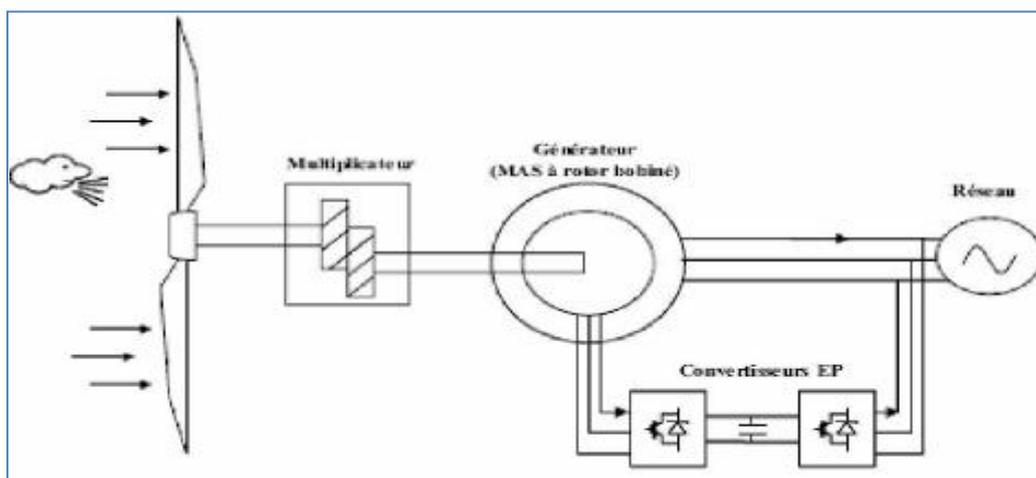


Figure 10 : éolienne à couplage électronique par le rotor

### 2.3. Caractéristique puissance-vitesse d'éoliennes de grandes puissances :

La caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones :

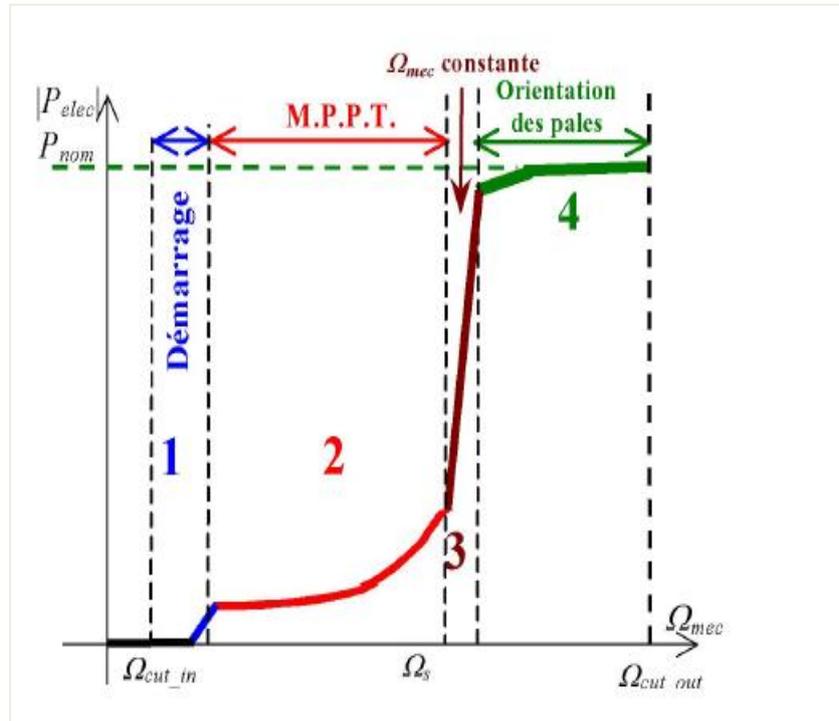


Figure 11 : Caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne

**Zone 1 :** C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse  $\Omega_{cut\_in}$

**Zone 2 :** Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliquée.

**Zone 3 :** Au delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importants, jusqu'à 90% de la puissance nominale  $P_{nom}$ .

**Zone 4 :** Arrivée à la puissance nominale  $P_{nom}$ , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control.

Au delà de la vitesse  $\Omega_{cut\_out}$ , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

Dans le cadre du parc de TAZA, les éoliennes utilisées sont à vitesse variable avec des génératrices électriques de type machine asynchrone à rotor bobiné : **Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)**.

### III. Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)

#### 1. Définition :

La MADA est un générateur à induction à rotor bobiné. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé de distribution alors que les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant : la puissance traversant ces convertisseurs peut alors être absorbée ou produite par la machine, selon le mode de fonctionnement. Le condensateur C1 entre les deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution. [2]

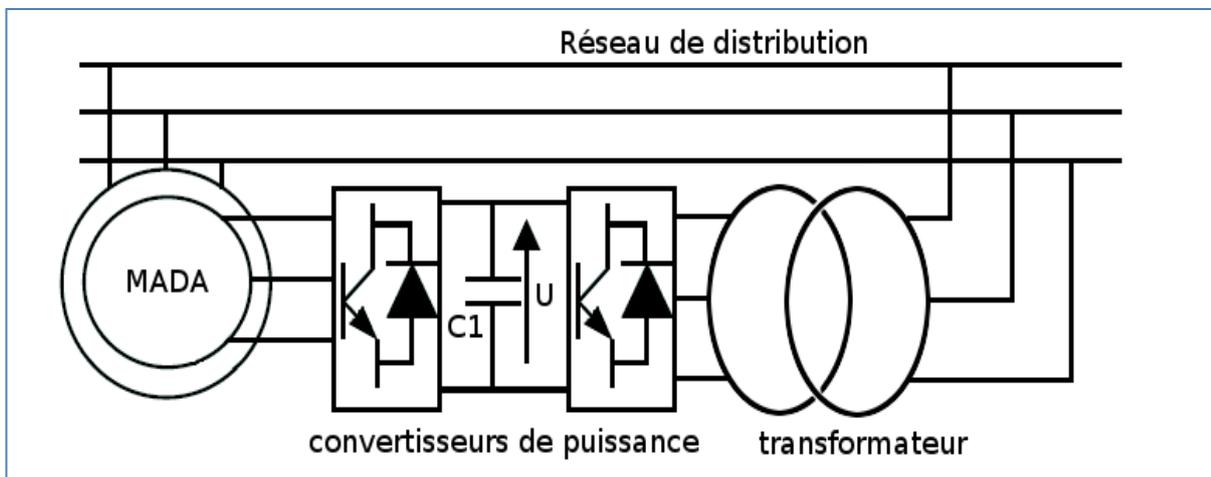


Figure 12 : la MADA

Les convertisseurs de puissance:

- **Le convertisseur côté rotor (CRT) :** est commandé de façon à faire varier l'angle du champ du rotor par rapport à celui du stator selon les besoins de réactif de la MADA.
- **Le convertisseur côté réseau (CRS) :** est commandé de façon à fonctionner comme un STATCOM permettant d'injecter dans le réseau un courant AC contrôlé en phase et en amplitude, et ainsi régler la tension en régimes dynamique et permanent.

#### 2. Modes de fonctionnement :

Pour les générateurs à base de machine asynchrone, la différence entre la vitesse mécanique  $\Omega$  et la vitesse dite synchrone (imposée par la fréquence du réseau)  $\Omega_s$  est définie par le glissement :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau : la vitesse du rotor est presque constante.

Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent, en effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo-synchrone et hyper-synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible. La vitesse variable permet à l'éolienne de fonctionner sur une plus large plage de vitesses de vent et de pouvoir tirer le maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent.

**Hyper-synchrone:** Si la vitesse mécanique est supérieure à la vitesse synchrone ( $g < 0$ ). La puissance extraite du circuit rotorique est envoyée sur le réseau à travers les convertisseurs de puissance (le rotor fourni de la puissance au réseau).

**Hypo-synchrone** ( $g > 0$ ) : la puissance circule alors du réseau vers le circuit rotorique.

## IV. Situation énergétique au Maroc

Dans le cadre de sa stratégie énergétique, le Maroc s'engage dans un vaste programme éolien, pour accompagner le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique dans le pays. De ce fait, un programme très ambitieux de développement de ces énergies renouvelable a été adopté récemment par le gouvernement, le Projet Marocain Intégré de l'Energie Eolienne, s'étalant sur une période de 10 ans pour un investissement total estimé à 31,5 milliards de dirhams, permettra au pays de porter la puissance électrique installée d'origine éolienne de 280 MW en 2010 à 2000MW à l'horizon 2020.[1]

### 1. Les Projets des éoliens

Le développement de **1720 MW** de nouveaux parcs éoliens à l'horizon 2020 est prévu dans le cadre du projet éolien :

- ☛ **720 MW** en cours de développement à **Tarfaya** (300 MW), **Akhfenir** (200 MW), **Bab El Oued** (50 MW), **Haouma** (50 MW) et **Jbel Khalladi** (120 MW).
- ☛ **1 000 MW** prévus sur 5 nouveaux sites choisis pour leur grand potentiel: **Tanger II** (150 MW), **Koudia El Baida** à **Tétouan** (300 MW), **Taza** (150 MW), **Tiskrad** à **Laayoune** (300 MW) et **Boujdour** (100 MW).[1]

### 2. Les objectifs

- Augmenter la part de l'énergie éolienne dans la capacité électrique totale à 14% à l'horizon 2020.
- Atteindre une capacité de production à partir de l'énergie éolienne de 2 GW et une capacité de production annuelle de 6600GWh, correspondant à 26% de la production électrique actuelle.

- Economiser en combustibles 1,5 million de tonnes équivalent pétrole annuellement, soit 750 millions de dollars US, et éviter l'émission de 5,6 millions de tonnes de CO2 par an.

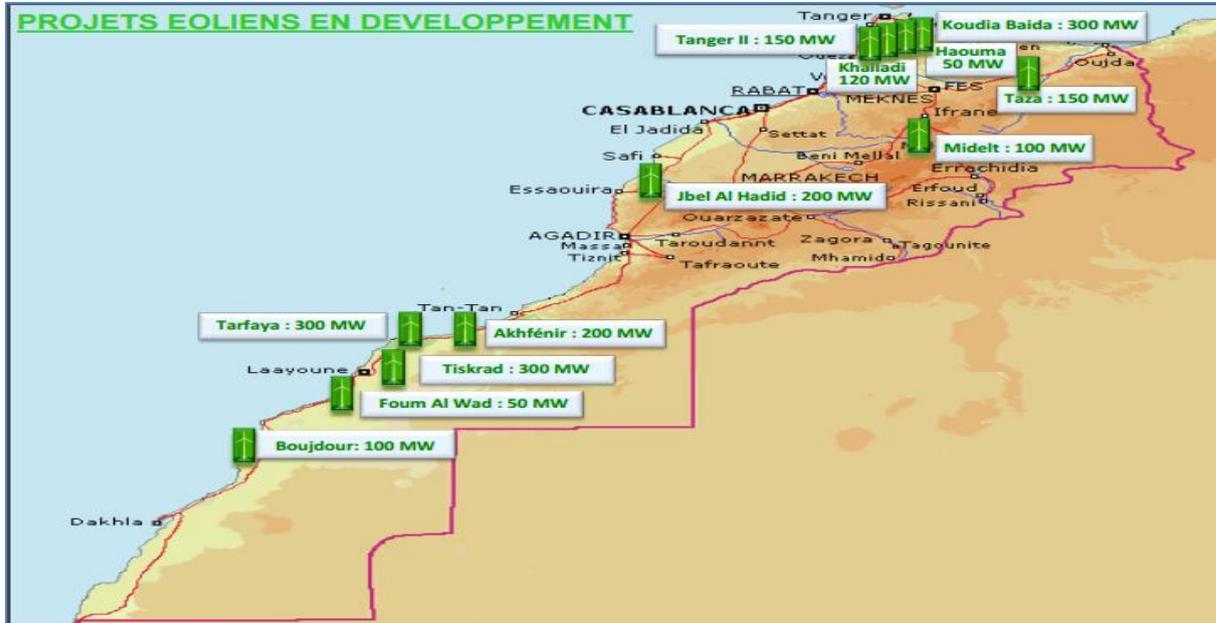


Figure 13 : projets éoliens en développement

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différents éléments d'une éolienne. Puis nous avons établi un comparatif entre les deux grandes familles d'éolienne existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable. A partir de ce comparatif, nous nous sommes intéressés aux éoliennes à vitesse variable avec des génératrices électriques de type Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA), et les différentes zones de fonctionnement.

L'intégration de ces aérogénérateurs dans le réseau cause des perturbations qui ont un impact sur la stabilité du réseau électrique, le chapitre qui suit définit ces perturbations et les solutions les plus adéquates pour les atténuer.

# CHAPITRE III : LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE : *les harmoniques et le flicker*

---

## Chapitre III: la qualité de l'énergie électrique, les harmoniques et le flicker

### Introduction

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré.

La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement.

Toutefois, cette tension subit généralement des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client, industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des harmoniques et les fluctuations rapides de tension 'le flicker' et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des paramètres de la qualité de l'énergie électrique. Nous parlerons également de l'origine, l'analyse et l'effet des harmoniques sur les récepteurs électriques de même pour le *flicker*.

### I. Paramètres de la qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. [3]

#### ✓ Qualité de la tension :

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants :

- la fréquence,
- l'amplitude des trois tensions,
- la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,
- la symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

#### ✓ La qualité du courant

Est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de  $2\pi/3$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale. Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, la qualité de l'énergie électrique est souvent réduite à la qualité de la tension. C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de qualité de l'énergie s'applique uniquement à celle de la tension.

### 1. Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues.

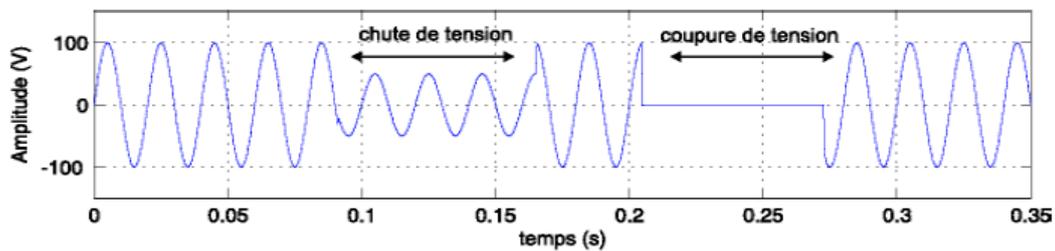


Figure 14 : creux et de coupure de tension.

### 2. Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé.

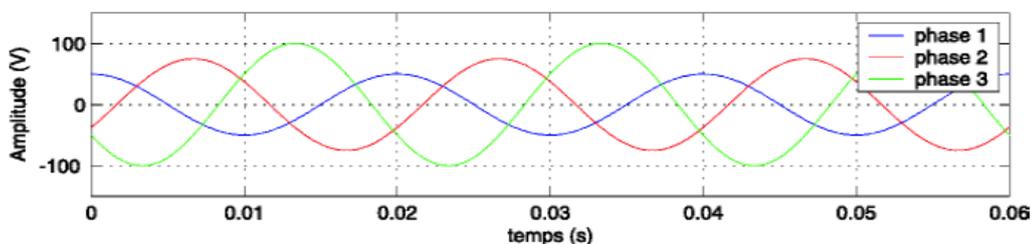


Figure 15 : le déséquilibre

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

### 3. Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome.

Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau.

Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ .

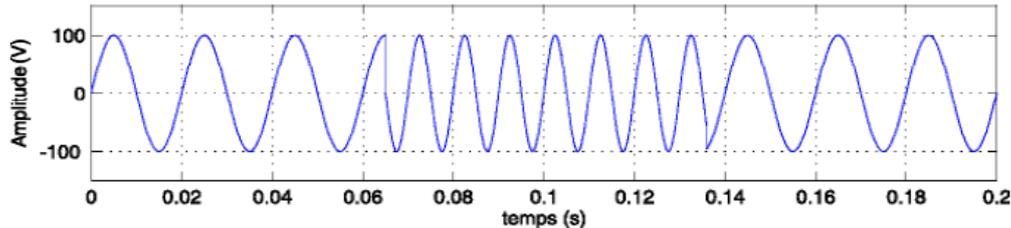


Figure 16 : La variation de la fréquence

### 4. Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de 10 % et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes.

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder.

Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1 % de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé *flicker*.

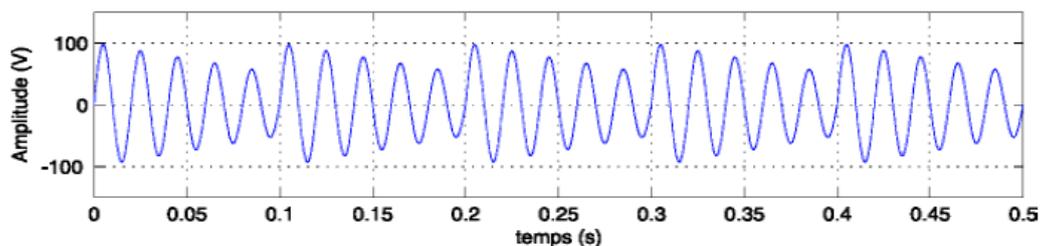


Figure 17 : Fluctuations de tension

Les fluctuations rapides de la tension '*Flicker*' feront l'objet d'une étude approfondie tout au long de ce rapport.

### 5. Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental.

La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipement de l'électronique de puissance à base de thyristors et de transistors.

Les inter-harmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter-harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de commande électrique.

La figure 5 montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence 50 Hz.

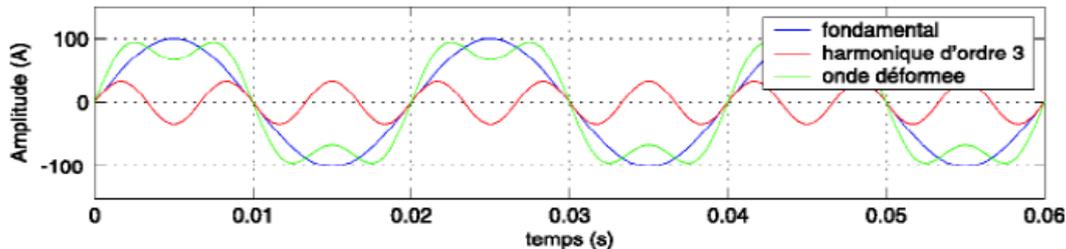


Figure 18 : les harmoniques

Les perturbations harmoniques feront l'objet d'une étude approfondie tout au long de ce rapport.

## II. Les perturbations harmoniques :

### 1. Origine des harmoniques :

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

#### 1.1. Emission en tension :

L'émission harmonique en tension due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques etc....) des bobinages des machines tournantes et des transformateurs.

- **Transformateurs** : Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours faible.
- **Alternateurs** : Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques (< 0.5%). Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde.

## 1.2. Emission en courant :

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdale représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

On peut distinguer sept différents types de charges perturbatrices élémentaires chez l'utilisateur, dont quatre sont des montages électroniques :

- le redresseur monophasé à filtre capacitif,
- le gradateur monophasé,
- le redresseur triphasé à thyristors :

Le redresseur triphasé à thyristors constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industriel. Ils représentent 55% de la puissance des matériels électroniques. Dans le domaine de la vitesse variable. Les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

- le redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif,
- les moteurs asynchrones,
- **les lampes :**

On distingue deux types de lampes qui produisent des courants harmoniques :

Les lampes fluorescentes et les lampes à vapeur haute pression. La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant l'illumination, ainsi qu'à la présence d'un ballast.

- **les appareils à arc électrique :**

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu.

## 2. Conséquences des harmoniques

On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type: les effets instantanés et les effets à terme.

### 2.1. Effets instantanés :

Les effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages :

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques:** En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- **Erreurs dans les appareils de mesure:** Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.
- **Vibrations et bruits:** Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

## 2.2. Effets à terme :

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

- **Echauffement des câbles et des équipements:** Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du suréchauffement du neutre et les enroulements comme pour les transformateurs ou les moteurs.
- **Echauffement des condensateurs:** L'échauffement est causé par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans le diélectrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, quelles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

## 3. Analyse des harmoniques :

La théorie classique de l'énergie électrique ne tient compte que des systèmes électriques basés sur des signaux sinusoïdaux. Cependant les signaux électriques présents sur les réseaux (surtout les courants) sont souvent perturbés et ils ne sont pas parfaitement sinusoïdaux. Dans le domaine de la qualité de l'énergie, il est indispensable de bien connaître tous les échanges d'énergie entre le réseau et les différentes charges de façon à pouvoir compenser les éventuelles perturbations.

Le concept d'harmonique a été introduit au début du XIXème siècle par Joseph Fourier, en démontrant que tout signal périodique non sinusoïdal peut être représenté par une somme ou série des sinusoides de fréquences discrètes.

La composante zéro de la série de Fourier est la composante continue, tandis que la première composante est appelée composante fondamentale. Dans le cas des systèmes raccordés au réseau, celle-ci est une composante à la fréquence nominale du réseau (50Hz). Le reste des composantes de la série sont appelés harmoniques et sont multiples de la fréquence fondamentale.

### 3.1. Caractérisation d'un contenu harmonique pour un signal :

Tout signal  $y(t)$  déformé et périodique de période  $T$  peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales et d'une composante continue, cette décomposition s'écrit sous les formes suivantes :

$$y(t) = Y_0 + \sqrt{2} (Y_1 \cdot \sin(\omega t - \varphi_1) + Y_2 \cdot \sin(2 \cdot \omega t - \varphi_2) + \dots + Y_h \cdot \sin(h \cdot \omega t - \varphi_h))$$

Qui peut s'écrire sous forme de somme :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot \omega t - \varphi_h)$$

Avec :

$Y_0$ : La valeur moyenne ou la composante continue du signal  $y(t)$

H : rang de l'harmonique,

$Y_h$  : La valeur efficace de l'harmonique au rang h,

$w$  : La pulsation fondamentale ( $2\pi \cdot f_1 = \frac{2\pi}{T}$ ),

$\varphi_h$ : La phase de l'harmonique au rang h.

### 3.2. Expression de la valeur efficace :

La valeur efficace vraie (TRMS values: *True Root Mean Square values*) conditionne les échauffements. Pour une grandeur périodique non sinusoïdale, son expression est :

$$Y_{trms} = \sqrt{Y_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2} = \sqrt{Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_{\infty}^2}$$

Cette définition est valable aussi bien pour les tensions que pour les courants. Il est à noter que pour une grandeur purement sinusoïdale, la valeur efficace correspond à sa valeur maximale divisée par la racine carrée de deux.

La mesure de la valeur efficace de la grandeur déformée s'effectue soit directement par des appareils dits à vraie valeur efficace ou thermiques ou à l'aide d'analyseurs de spectre.

### 3.3. Taux de distorsion harmonique THD (%)

Le taux individuel d'harmonique est défini comme le rapport (en %) de l'amplitude de l'harmonique au rang h ramenée à celle du fondamental :

$$T_{aux(h)} = 100 \cdot \frac{Y_{h,trms}}{Y_{1,trms}} (\%)$$

La notion la plus couramment usitée est le taux global de distorsion harmonique (THD : *Total Harmonic Distorsion*) pour caractériser le taux de déformation d'une onde électrique. Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques, c'est le rapport de la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques du signal sur la valeur efficace du même signal à la fréquence fondamentale :

$$THD = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_{h,trms}^2}}{Y_{1,trms}} (\%)$$

Les effets sont directement liés à ce taux, en voici des valeurs typiques :

Taux de distorsion harmonique en tension	THD < 5%	5% < THD < 7%	7% < THD < 9%	THD > 9%
Conséquences	Pas de problèmes	Dysfonctionnement des appareils "sensibles"	Dysfonctionnement des appareils "normaux"	Dysfonctionnement de quasi tout les appareils, destruction de certains matériels sur le court, moyen et long terme quasi certains.

Tableau 2 : Taux de distorsion harmonique en tension

### 3.4. Expression des puissances mises en jeu

Pour une charge non linéaire, alimentée par une source de tension  $v(t)$  et parcourue par un courant  $i(t)$ , dont les expressions s'écrivent respectivement :

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot \omega t)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot \omega t - \varphi_h)$$

est le siège d'une puissance instantanée :

$$p(t) = m \cdot v(t) \cdot i(t) \text{ avec } m \text{ est le nombre de phase}$$

Dans ce cas, le calcul de la puissance instantanée comporte des produits de fonctions sinusoïdales de fréquences différentes.

Par contre, seules les composantes de même fréquence contribuent à l'élaboration de la puissance moyenne ou puissance active  $P$  effectivement consommée et exprimée en watt :

$$P = m \cdot \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h$$

- L'expression de la puissance réactive  $Q$  est définie comme la somme pondérée des réactions associées à chaque rang harmonique, à la différence de la puissance active. Elle s'exprime en volt Ampère Réactif VAR :

$$Q = m \cdot \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h$$

- En ce qui concerne la puissance apparente  $S$ , elle se calcule à l'aide du produit des valeurs efficaces de la tension et du courant et n'est plus la résultante comme en régime purement sinusoïdal. Son unité est le *Volt Ampère (VA)* :

$$S = m \cdot V_{rms} \cdot I_{rms} = m \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$$

- La contribution des produits des rangs harmoniques engendre une puissance déformante  $D$ , exprimée en volt ampère déformant (*vad*) et peut s'écrire sous la forme :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$$

- Le facteur de puissance  $F$  est égal au rapport de la puissance active sur la puissance apparente. Il caractérise le dimensionnement d'un système électrique puisqu'il représente la puissance utile consommée par rapport à la puissance apparente au niveau de la source.

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \cdot \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}}$$

Le cas particulier, où la source de tension est considérée comme parfaitement sinusoïdale (réseau de distribution idéal) conduit à une simplification des écritures. En effet, la tension  $v(t)$  s'écrit :

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega t)$$

- D'où les nouvelles expressions des puissances :

$$P = m \cdot V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

$$Q = m \cdot V \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$$

- Avec  $\cos \varphi_1$  qui est le facteur de déplacement fondamental à la source. En ce qui concerne le facteur de puissance il devient :

$$F = \frac{P}{S} = \frac{I_1 \cdot \cos \varphi_1}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}}$$

- Ce qui peut s'écrire aussi sous la forme :

$$F = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

### III. Fluctuations de tension : Flicker

#### 1. L'origine du flicker :

Comme les éoliennes ont une influence sur le réseau électrique, ses générateurs sont aussi très sensibles aux perturbations du réseau et ont tendance à se déconnecter rapidement; par exemple lors d'un creux de tension ou lors d'une variation de la fréquence l'enclenchement des générateurs peut provoquer des variations rapides de tension dues à des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations éoliennes. [10]

Les variations rapides de tension engendrées par les fermes éoliennes ont des origines différentes et sont classées en deux catégories:

##### 1.1 Flicker en fonctionnement continu :

Le *flicker* produit durant le fonctionnement continu est causé par les fluctuations de puissance, qui émanent principalement des variations de la vitesse du vent, du cisaillement du vent, de l'effet d'ombre de la tour et de propriétés mécaniques de l'aérogénérateur.[11]

##### 1.2 Flicker lors des opérations de couplage :

Les opérations de commutation produisent également du *flicker*. Des opérations de commutation typiques sont la connexion et déconnexion du réseau, des aérogénérateurs. Des démarrages, arrêts ou commutations entre générateurs entraînent des variations de la puissance produite, celles-ci provoquant des variations de tension dans le Point de Connexion Commun et donc l'émission *de flicker* . [11]

##### o La chute de tension :

Le système étudié est un réseau radial avec une ligne de transmission via une source de tension de 225 kV auquel est connectée une ferme éolienne de 150 MW, comme le montre la figure suivante:

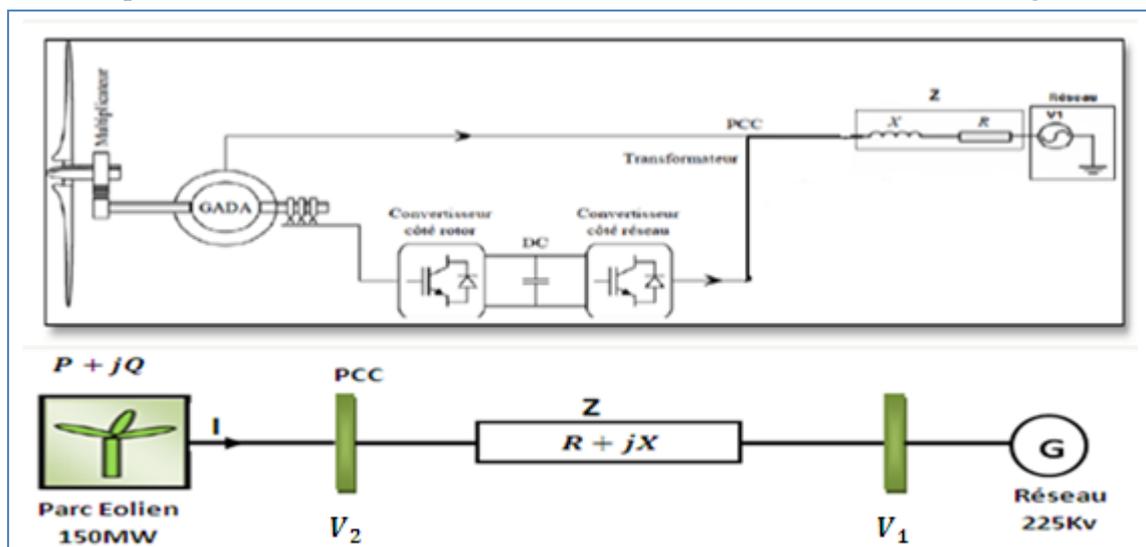
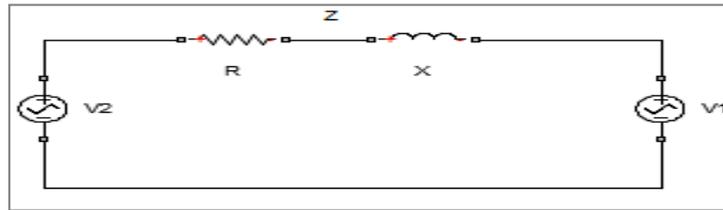


Figure 19 : schéma d'une éolienne connectée au réseau

**Le schéma équivalent :**



**Figure 20 : Schéma équivalent du parc connecté au réseau.**

<b>X</b> : réactance de la ligne	<b>I</b> : courant de la ligne
<b>R</b> : Résistance de la ligne	<b>P</b> : puissance active du parc
<b>Z</b> : L'impédance de ligne	<b>Q</b> : puissance réactive du parc
<b>V<sub>1</sub></b> : tension nominale du réseau	<b>S</b> : puissance apparente de la charge
<b>V<sub>2</sub></b> : Tension au PCC	<b>S<sub>cc</sub></b> : puissance de court-circuit (au PCC)

Considérons le schéma équivalent ci-dessus (figure 20). La chute de tension est due au courant I dans l'impédance, et V<sub>2</sub> étant pris comme référence

$$\Delta V = Z * I = V_1 - V_2$$

La puissance apparente est :  $S = V_2 I^* = P + jQ$

Alors :  $I = \frac{P - jQ}{V_2}$

Donc :  $\Delta V = \frac{(R + jX)(P - jQ)}{V_2}$

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2} + j \frac{XP - RQ}{V_2}$$

$$\Delta V = \Delta V_{Re} + j \Delta V_{Im}$$

⇒ **La chute de tension dépend simultanément de la puissance active et réactive de la charge.**

Comme  $\Delta V = V_1 - V_2$ , donc  $V_1 = \Delta V + V_2$

le module de la tension V1 est :  $|V_1|^2 = \left( V_2 + \frac{RP + XQ}{V_2} \right)^2 + \left( \frac{XP - RQ}{V_2} \right)^2$

Et comme:  $\frac{XP - RQ}{V_2} < V_2 + \frac{RP + XQ}{V_2}$ , on peut approximer que  $|V_1|^2 = \left( V_2 + \frac{RP + XQ}{V_2} \right)^2$

**D'où:**

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \frac{RP + XQ}{V_2}$$

La chute de tension aux bornes de la ligne de connexion d'une éolienne au réseau peut être approximée par la relation suivante :

$$\frac{\Delta V}{V_2} = \frac{RP+XQ}{V_2^2}$$

○ **La chute de tension pour les réseaux haut tension HT :**

Dans les réseaux HT, La réactance X est le paramètre prédominant dans l'impédance c'est-à-dire  $R \ll X$ ,

Alors, on peut écrire :

$$\frac{\Delta V}{V_2} = \frac{XQ}{V_2^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

La puissance générée par les éoliennes est d'origine fluctuante, ce qui entraîne d'après l'expression précédente des fluctuations de tension dans la zone du réseau proche du point de connexion de ces éoliennes. Dans le réseau de transport constitué de ligne **HT** et **THT**, les variations de tension sont essentiellement induites par les transits de la **puissance réactive**.

Les éoliennes actuellement connectées au réseau de transport doivent donc participer au réglage de la tension via un réglage de la puissance réactive. [10]

## **2. Les conséquences :**

Le principal effet des fluctuations de tension est la gêne produite par le papillotement de l'éclairage (fluctuation de la luminosité des lampes). La gêne physiologique dépend de l'amplitude, de la cadence de répétition et de la durée des variations de tension, ainsi que de la composition spectrale de la lumière. [11]

## **3. Méthodologie de mesure de Flicker**

Le papillotement « Flicker » est un paramètre important de mesure de la qualité de l'énergie électrique. Les indices utilisés pour évaluer le papillotement de longue et courte durée sont respectivement l'indices de sévérité le *Plt* et le *Pst*. [12]

### **3.1 Les indicateurs de la sévérité du flicker :**

Les indicateurs de la sévérité du flicker sont :

- Le ***Pst*** (*small time*) correspond à ce que l'on appelle le *flicker* de courte durée. La sévérité de l'effet est observée sur un intervalle de 10 minutes.
- Le ***Plt*** (*long time*) correspond au flicker de longue durée et prend en compte les appareils à cycle long ou variable. Le temps de référence est alors de 2 heures.

**NB : En fonctionnement établi :  $Pst = Plt$**

**Lors des opérations de couplage :  $Pst \neq Plt$**

### 3.2 Les limites de Flicker :

Le calcul du coefficient de *flicker* a pour rôle de vérifier que le raccordement du parc éolien n'entraîne pas un niveau inacceptable de fluctuations de tension au point de connexion commun. Pour établir cette vérification on définit :

- **Les niveaux de compatibilité**

Les niveaux de compatibilité constituent les limites d'émission telles que la sommation des effets individuels conduise à des niveaux perturbateurs restant inférieurs aux niveaux de compatibilité.

- **Les niveaux de planification**

Le niveau de planification est sous la responsabilité de l'opérateur de réseau, les niveaux de planification qui fournissent une marge par rapport aux niveaux de compatibilité.

Le tableau suivant présente les valeurs limites que le *flicker* ne doit pas dépasser pour ce dernier sera acceptable, donnée par la norme CEI 61400-21 : [11]

Facteur de <i>Flicker</i>	Niveau de planification		Niveau d'émission
	MTA	MTB	MTA & MTB
<b>Pst</b>	<b>0,9 à 0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,35</b>
<b>Plt</b>	<b>0,6 à 0,7</b>	<b>0,6</b>	<b>0,25</b>

Tableau 3 : les limites de *Flicker*

### 3.3 Méthode de calcul analytique

A chaque fois, trois calculs de *flicker* sont réalisés:[12]

- **Plt/Pst en fonctionnement établi ( $Plt = P_s$ ) :**

La valeur du Pst est en fonction de coefficient de *flicker* et de la puissance apparente de court-circuit au PCC:

$$P_{lt\Sigma} = P_{st\Sigma} = \frac{1}{S_k} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (C(\psi_k, V_a) * S_n)^2}$$

$C(\psi_k, V_a)$ : Le coefficient de *Flicker*.

$S_k$  : La puissance de court-circuit ou point de raccordement.

$S_n$  : La puissance apparente de turbine éolienne.

$N_{wt}$ : Le nombre des turbines éoliennes connectées au point de raccordement.

- **Flicker lors des opérations de couplage :**

$$P_{lt\Sigma} = \frac{8}{S_k} \left( \sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{10m,i} * (k_{f,i}(\psi_k) * S_{n,i})^{3.2} \right)^{0.31}$$

$$P_{st\Sigma} = \frac{18}{S_k} \left( \sum_{i=1}^{N_{wt}} N_{120m,i} * (k_{f,i}(\psi_k) * S_{n,i})^{3.2} \right)^{0.31}$$

$N_{10m,i}$  et  $N_{120m,i}$  : Le nombre de fluctuation de chaque turbine éolienne dans une période de 10 min et 120 min. (voir l'annexe)

$k_{f,i}(\psi_k)$  : *Flicker step factor* pour chaque turbine éolienne proposée par le fabricant de turbine. (Voir l'annexe)

### 3.4 Méthode statistique

La norme CEI 61000-4-15 définit la méthode de mesure et les performances des appareils destinés au mesurage des fluctuations de tension susceptibles de créer un scintillement des dispositifs d'éclairage, ces appareils qui mesurent le *flicker* s'appellent « *Flickermètre* ».

Les spécifications fonctionnelles de cet appareil sont : l'adaptation de la tension d'entrée, la simulation de la réponse lampe-œil-cerveau ou calcul du *flicker* instantané, le calcul de la Dose de *flicker*, et finalement l'évaluation statistique du niveau de flicker : calcul de  $P_{st}$  et  $P_{lt}$ . [11]

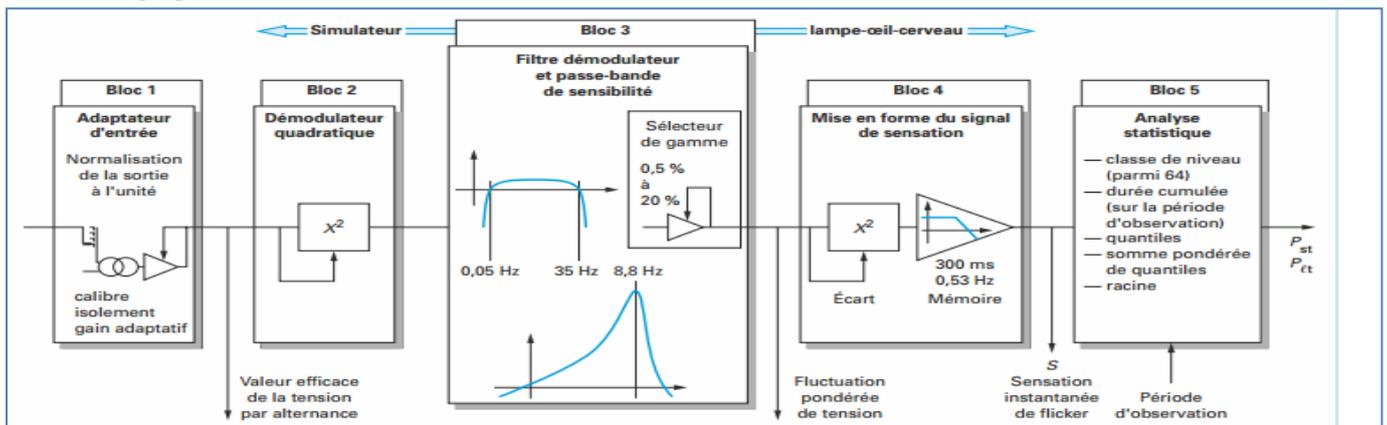


Figure 21 : Le principe du flickermètre

- **Bloc 1 (Adaptation d'entrée) :**

La mesure de tension est mise à l'échelle au moyen d'un gain ajustable de façon à améliorer la sensibilité de la mesure la grandeur mesurée est ainsi normée à l'unité par ce bloc.

- **Bloc 2 (démodulateur quadratique) :**

Après cette adaptation d'entrée, la tension est élevée au carré ; il s'agit de la fonction dite démodulateur quadratique. Cette étape correspond au phénomène physique qui crée le *flicker*.

- **Bloc3 (filtre démodulateur et passe bande sensibilité):**

La tension est filtrée pour éliminer la composante continue, la tension filtrée est alors pondérée en fonction de la fréquence pour approcher la réponse physiologique.

- **Bloc 4 (mise en forme du signal de sensation):**

En sortie de ce bloc, une grandeur  $S$  nommée sensation instantanée *du flicker* est exprimée en unités de perception (udp).

- **Bloc 5 (analyse statistique):**

Caractérise la sensation instantanée du *flicker* en fonction de la gêne. Il s'agit d'une analyse statistique des fluctuations.

## IV. Les solutions d'atténuation des fluctuations de tension et les harmoniques :

### 1. Dépollution des harmoniques :

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques. Deux types de solutions sont envisageables.

La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde consiste à réaliser un filtrage des composantes harmoniques.

La première classe de solutions s'intéresse à la conception des circuits tandis que la seconde, que nous présentons par la suite consiste à filtrer les courants harmoniques. Les principales techniques se rattachant à cette dernière approche sont proposées et comparées dans ce chapitre.

#### 1.1 Solutions traditionnelles de dépollution :

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électrotechniciens :

- **Augmentation de la puissance de court-circuit :**

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance. La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués.

- **Compensation de la puissance réactive :**

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau, à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance pour la compensation locale ou près d'un transformateur d'alimentation pour la compensation globale.

- **Le filtre passif dit "résonant" :**

Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique. Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classer les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau.

Cela permet de définir deux grands modes de filtres passifs: les **filtres séries** utilisé pour les charges génératrices de tensions harmoniques, **les filtres parallèles** utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques.

## 1.2 Solutions modernes de dépollution:

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif.

- La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques.
- La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT et MOSFET. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- **le filtre actif parallèle (FAP):**

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent commandé comme une source de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Il est conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.

- **le filtre actif série (FAS):**

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique), comme le montre la figure 2.6, venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

Il est conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

- **la combinaison parallèle - série actifs :**

La combinaison parallèle - série actif est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série.

Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actifs ou *Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*. L'UPQC possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série.

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle, il permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

## 2. Atténuation des fluctuations de tension :

Les effets des fluctuations de tension sont principalement liés aux variations d'amplitude de la tension. Un système est dit bien conçu quand il peut délivrer une énergie d'alimentation fiable avec un niveau de tension dans des limites acceptables. Chaque fois que le niveau de tension en un point du système est soumis à des variations cela est dû à un déséquilibre entre la puissance fournie et consommée. La variation de tension peut être expliquée par un déséquilibre entre la puissance réactive délivrée et celle consommée.

D'après la relation de la chute de tension en HT qu'on a trouvée précédemment :

$$\frac{\Delta V}{V_2} = \frac{XQ}{V_2^2} = \frac{Q}{S_{cc}}$$

Les amplitudes des fluctuations de tension peuvent être limitées en deux façons :

Soit par l'**augmentation de la  $S_{cc}$**  ou par la **Compensation de la puissance réactive**.

### 2.1 Augmentation de la puissance de court-circuit :

#### La capacité série :

Les compensateurs série permettent de modifier l'impédance de la ligne. On considère la relation suivante :

$$S_{cc} = \frac{V_2^2}{Z}$$

D'après cette relation, l'augmentation de la puissance de court-circuit au  $P_{cc}$  consiste à diminuer l'impédance de la ligne.

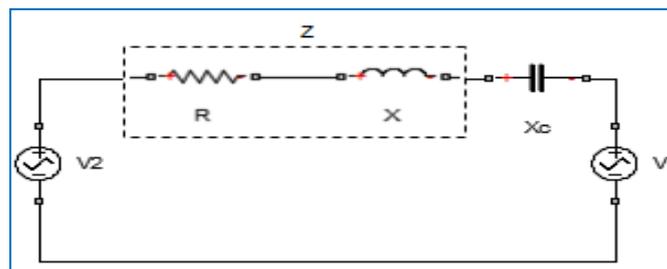


Figure 22: Circuit équivalent après l'insertion de la capacité

L'expression de la chute de tension devient :

$$\Delta V = \frac{Q(X - X_c)}{V_2}$$

- Alors une réduction importante de variation de tension est produite lorsqu'on ajoute un condensateur série à la ligne. [13]

### 2.2 La Compensation de la puissance réactive :

#### 2.2.1. Moyens traditionnelles :

- **Compensateurs synchrones**

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcitées, fournir ou absorber de la puissance réactive.

- **Condensateurs parallèles**

Les compensateurs parallèles permettent le contrôle de la tension en un point du réseau grâce à l'injection de puissance réactive.

## 2.2.2. Moyens modernes : les systèmes FACTS

Le concept FACTS « **F**lexible **A**lternative **C**urrents **T**ransmission **S**ystems » est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT.....).

Ces équipements permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique c'est-à-dire les différents paramètres du réseau électrique tension, impédance, la phase du réseau etc. ....

La technologie de ces systèmes (interrupteur statique) leur assure une vitesse supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques. De plus, ils peuvent contrôler le transit de puissance dans les réseaux et augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant, voire en améliorant la stabilité des réseaux électriques. [14]

Les compensateurs parallèles (shunt) sont très utilisés pour le contrôle de tension lorsque la variation de la charge est lente. De plus le compensateur shunt placé au point milieu de la ligne de transmission donne des solutions aux problèmes de la stabilité. Les compensateurs shunts les plus connus sont : SVC et STATCOM.

- **SVC :**

Le compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunts de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS), dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des nœuds.

Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. [14]

### Fonctionnement du SVC :

Le SVC est constitué d'une batterie de condensateurs commutés à thyristors (*TSC Thyristor Switched Capacitors*), et d'un banc de bobines contrôlées à thyristors (*TCR Thyristor Controlled Reactors*) Avec une coordination appropriée de l'interrupteur des condensateurs et le contrôle des bobines, la puissance réactive de sortie peut être variée continuellement entre les taux capacitifs et inductifs de l'équipement.

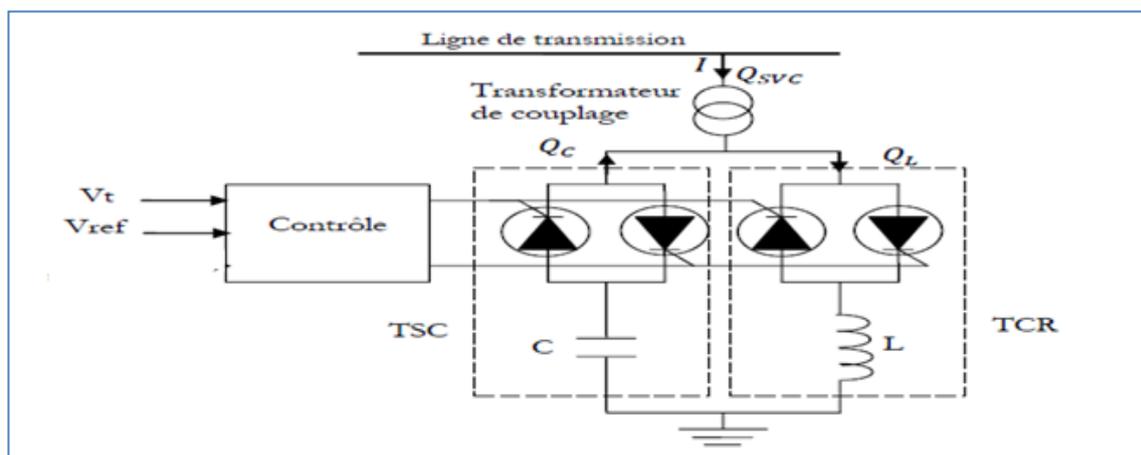


Figure 23 : la structure du SVC

- **Réactance commandée par thyristors (TCR) :**

La réactance commandée par thyristors TCR (*Thyristor – Controlled Reactor*) possède une bobine d'inductance fixe  $L$  branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle. Il permet un contrôle plus fin de la puissance réactive car elle permet un contrôle continu du courant de compensation.

- **Condensateur commuté par thyristors (TSC) :**

Le condensateur commuté par thyristors TSC (*Thyristor – Switched Capacitor*) est composé d'un condensateur fixe «  $C$  » branché en série avec une valve à thyristors bidirectionnelle.

Le TCR ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'élément inductif. C'est pour cela qu'on associe ce dispositif avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (TSC) qui fournit de l'énergie réactive au réseau.

- **STATCOM :**

Le STATCOM (Statice Compensateur) appelé aussi en anglais Advanced Statice Var Générateur ASVG, représente la deuxième génération de FACTS. Le STATCOM est un nouveau compensateur de puissance réactive qui surmonte les limitations techniques et le coût élevé du SVC. [15]

Ce compensateur se compose d'un onduleur triphasé à base de thyristor GTO et de diode en antiparallèle, couplé au réseau à travers un transformateur comme illustré par la figure :

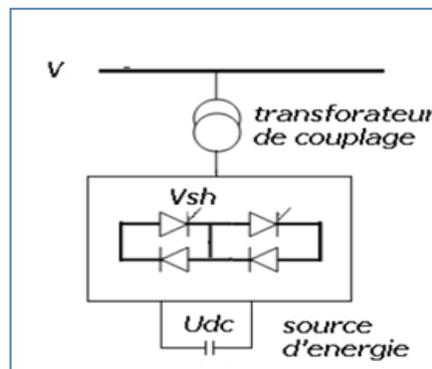


Figure 24 : schéma équivalent du *statcom*

Avantage du STATCOM :

- L'étendue de la plage d'opération est plus large qu'avec un SVC classique.
- Les performances dynamiques sont plus élevées qu'avec un SVC classique.
- Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.
- Bonne réponse à faible tension : il est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- L'espace nécessaire pour l'installation est réduit en raison de l'absence de bobines d'inductance et de condensateur.

## **Conclusion :**

Comme nous avons pu le constater dans ce premier chapitre, la qualité de l'énergie électrique est affectée pas des les différents type des perturbations d'une manière plus précises les harmoniques et le flicker qui engendrent la dégradation de la qualité de l'énergie et donc une mauvaise satisfaction et prestation du client.

Cependant aux perturbations elles subies des solutions existent, soit traditionnelles ou modernes, doivent être prise afin de minimiser les effets des perturbations et garantir une alimentation de qualité. Pour les harmoniques, les solutions traditionnelles comme les filtres passifs qui ne sont pas très performants avec des charges non linéaire et variable. Pour cela et avec les progrès de l'électronique de puissance et de l'informatique, les travaux de recherches ont été orientés vers des nouvelles solutions à savoir les filtres actifs.

Pour le flicker, la mesure de ces fluctuations peut ce faire d'une manière analytique comme il peut se calculer directement par le Flickermètre. Après le calcul de ces fluctuations vient le rôle de plusieurs dispositifs permettant l'atténuation du flicker soit par des solutions classiques ou modernes (les systèmes FACTS).

Puisque le dispositif STATCOM à le pouvoir d'échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance (il n' ya pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau) contrairement au SVC, le chapitre suivant va avoir comme objectif l'étude détaillée du compensateur synchrone statique 'le STATCOM', sa structure générale, sa modélisation et sa stratégie de commande. De même, nous allons détailler la structure du filtre actif parallèle, les différents éléments le composant ainsi que sa stratégie de commande.

## CHAPITRE IV : LE FILTRE ACTIF PARALLELE (FAP) ET LE COMPENSATEUR SYNCHROME STATIQUE (STATCOM)

---

## Chapitre IV: le filtre actif parallèle et Le Compensateur synchrone statique

### Introduction

Les objectifs de ce chapitre sont : d'une part, de comprendre la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général comme une solution moderne et adéquate permettant de compenser les courants harmoniques. Nous examinerons le rôle des multiples éléments le composant et aussi, nous nous ferons présenter la commande principale de filtrage actif.

D'autre part, de comprendre la structure du compensateur synchrone statique (STATCOM) ainsi que son fonctionnement général comme une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux fluctuations rapides de tension 'le flicker'. Nous examinerons le rôle des multiples éléments le composant et aussi, nous nous ferons présenter sa commande principale.

### I. Structure du Filtre Actif Parallèle :

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux parties, une partie puissance et une partie commande. [7]

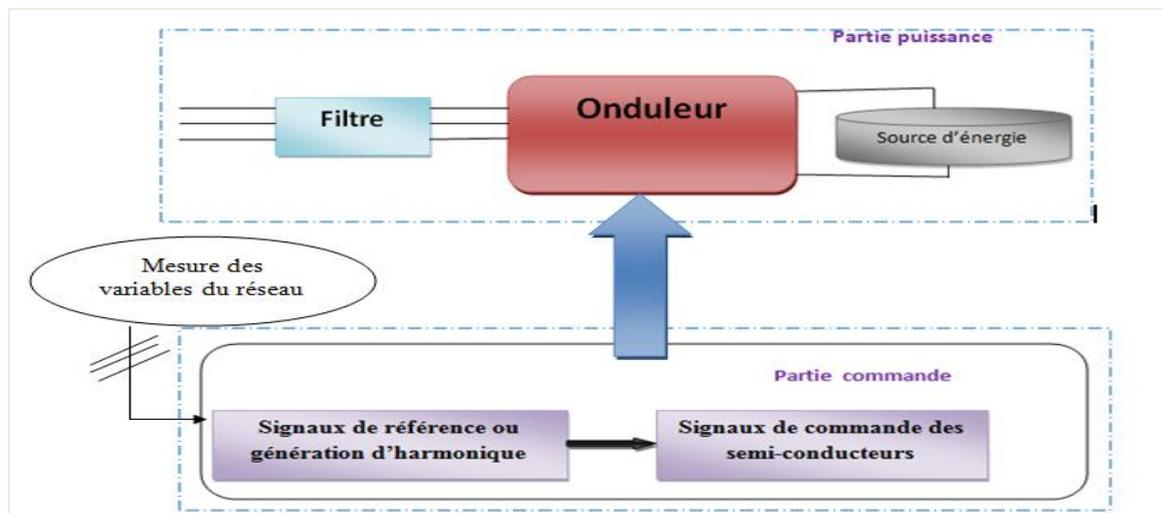


Figure 25 : Structure d'un filtre actif parallèle

- ✓ La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie. Elle est constituée d'un onduleur de tension deux niveaux à base d'interrupteur de puissance (IGBT) avec une diode antiparallèle ; d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif et d'un filtre à la sortie de l'onduleur.
- ✓ La partie commande, sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs formant l'onduleur. Elle est constituée de l'algorithme de détection de courant de référence et de la commande de l'onduleur de tension.

## 1. Etudes de la partie puissance :

### 1.1. Modélisation de l'onduleur de tension deux niveaux :

L'onduleur est la partie essentielle du filtre actif. Dépendamment du type de filtre de couplage le reliant au réseau ainsi que de l'élément passif qui lui sert de source d'énergie, il s'agira d'un onduleur de tension ou de courant.

L'onduleur peut être commandé en tension ou en courant et peut donc se comporter comme une source de tension ou de courant vis-à-vis du circuit extérieur. En pratique, suivant le type de correction à apporter au réseau, une structure sera préférée à l'autre si elle rend plus aisée et moins onéreuse la réalisation de l'ensemble convertisseur commande.

L'onduleur de tension, contrairement à celui de courant est caractérisé par son élément d'alimentation en énergie qui est un condensateur. La tension aux bornes de ce condensateur doit être maintenue constante.[7]

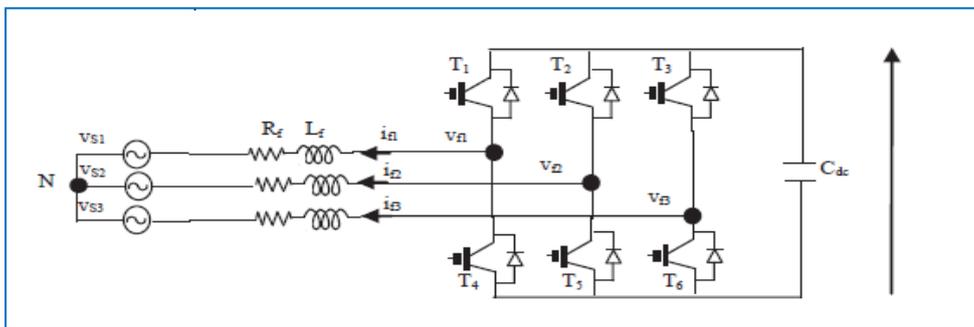


Figure 26 : onduleur deux niveaux

Les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant.

Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur sont associés en parallèle avec des diodes. Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture. Les semi-conducteurs d'un même bras de l'onduleur sont commandés de façon alternée, la conduction de l'un entraînant le blocage de l'autre.

Le fonctionnement de l'onduleur se déroule de manière à ce que les semi-conducteurs d'un même bras ne soient jamais fermés simultanément, au risque de court-circuiter le condensateur. En effet, les semi-conducteurs du même bras peuvent être ouverts pendant un temps défini comme étant un temps mort afin d'éviter ce risque.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure 30 dépendent de l'état des signaux de commande (S1, S2, S3) comme il est défini par :

$$S1 = \begin{cases} 1 & \text{T1 fermé T4 ouvert} \\ 0 & \text{T1 ouvert T4 fermé} \end{cases}$$

$$S2 = \begin{cases} 1 & \text{T2 fermé T5 ouvert} \\ 0 & \text{T2 ouvert T5 fermé} \end{cases}$$

$$S3 = \begin{cases} 1 & \text{T3 fermé T6 ouvert} \\ 0 & \text{T3 ouvert T6 fermé} \end{cases}$$

Les tensions de ligne, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} - V_{f2} \\ V_{f2} - V_{f3} \\ V_{f3} - V_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S1 - S2 \\ S2 - S3 \\ S3 - S1 \end{bmatrix} V_{dc}$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, poses par  $v_{fx}$  ; avec ( $x = \{1, 2, 3\}$ ), sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient l'équation suivante :

$$V_{fx} = V_{sx} + L_f \frac{di_{fx}}{dt} + R_f i_{fx}$$

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées et sachant que la somme des courants injectes par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{s1} + V_{s2} + V_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases}$$

Nous pouvons donc déduire des équations (1.4) et (1.5) la relation suivante :

$$V_{f1} + V_{f2} + V_{f3} = 0$$

A partir des équations (1.3) et (1.6), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S1 & -S1 & -S3 \\ -S1 & 2S2 & -S3 \\ -S1 & -S2 & 2S3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3}$$

Puisque les grandeurs S1, S2 et S3 peuvent prendre chacune deux valeurs (0 ou 1), il en résulte huit commandes possibles, présentées dans le tableau 4:

état	S1	S2	S3	Vf1	Vf2	Vf3
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$
2	0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$
3	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$
4	0	0	1	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$
5	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
6	0	1	1	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau 4 : Tensions générées par l'onduleur de tension deux niveaux

## 1.2. Système de stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait le plus souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $U_{dc}$ . [7]

Une certaine quantité de l'énergie doit être emmagasinée en permanence dans la source continue. Mais à cause des pertes dans les interrupteurs et dans le condensateur, la source continue doit recevoir son énergie du réseau continuellement à travers le convertisseur.

Pour son fonctionnement, la tension  $V_{dc}$  est maintenue constante afin de remédier aux fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage.

## 1.3. Filtre de sortie

Le rôle principal du filtre de sortie est de permettre la connexion du convertisseur de tension au réseau électrique, qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du convertisseur et le réseau. A ce titre, l'inductance  $L_f$  intervient dans la commandabilité du courant du filtre.

Ce filtre à un double rôle, il limite la dynamique du courant et réduit aussi la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations.

Dans le cas du FAP, ce filtre est composé d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ . [7]

## 2. Etude de la partie commande :

La commande est mise en œuvre en trois étapes :

- Dans la première étape, la tension de réseau et le courant de la charge sont détectés à l'aide de transformateurs de mesures (le TC et le TP).
- Dans la deuxième étape, on détermine le courant de référence à partir des méthodes d'identifications approuvées.
- Dans la troisième étape de commande, les signaux de commutation de semi-conducteur de l'onduleur de l'FAP sont générés en utilisant, L'hystérésis, MLI classique ou vectorielle, en mode glissant, ou des techniques de contrôle à base de logique floue.

Donc la commande d'un filtre actif parallèle triphasé est basée sur la division du système en deux boucles. Le premier sert à générer les courants de références, que l'onduleur doit injecter dans le point de raccordement, quant au deuxième, il sert à contrôler les courants injectés par l'onduleur de sorte qu'ils suivent le plus fidèlement possible ceux de la référence.

### 2.1 Méthodes d'Identification des Harmoniques du FAP

#### 2.1.1. Introduction

Les performances de la compensation des harmoniques d'un filtre actif parallèle dépendent principalement de la technique utilisée pour calculer le courant de référence qui est l'élément clé qui assure le bon fonctionnement de l'FAP, elle a la capacité de déterminer les attributs spécifiques des harmoniques (fréquence, amplitude, phase, le temps d'occurrence, de la durée et de l'énergie) à partir d'un signal d'entrée (qui peut être tension ou courant) en utilisant un algorithme mathématique particulier.

L'estimation du signal de référence est initiée par la détection de signaux de tension / courant essentiels afin de recueillir les informations nécessaire pour les variables de système d'identification.

- Les variables de tension à détecter sont la tension de la source ( $v_s$ ), la tension du bus continu de l'onduleur ( $v_{dc}$ ) et la tension de référence ( $v_{dc\_ref}$ ).
- Pour le courant les variables typiques de courant sont : le courant de charge ( $i_c$ ) et le courant injecter par l'onduleur ( $i_f$ ).

### 2.1.2. Méthode des puissances active et réactive instantanées PQ:

L'extraction des harmoniques est réalisée à partir de la puissance instantanée calculée en repère fixe, en utilisant la transformée de Concordia. Ainsi, les puissances sont décomposées en une composante continue, liée au fondamental, et en une composante alternative, liée aux harmoniques, qui peuvent être séparées en utilisant un filtre passe-haut.[7]

Dans cet algorithme de contrôle, les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée ( $a-b-c$ ) sont converties en système biphasé ( $\alpha-\beta$ ) équivalent à l'aide de la transformée de Concordia qui laisse la puissance invariante :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Et :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

- La puissance réelle instantanée  $p$  et la puissance réactive instantanée  $q$  peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

Ce qui nous donne :

$$p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad \longrightarrow \quad \text{puissance réelle instantannée}$$

$$q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \quad \longrightarrow \quad \text{puissance imaginaiire instantanné}$$

- La puissance réelle instantanée ainsi que la puissance imaginaire instantanée peuvent être exprimées de la façon suivante :

$$p = \bar{p} + \tilde{p}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}$$

Où :  $\bar{p}$  et  $\bar{q}$  : les composantes continues de p et q.

$\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  : es composantes harmoniques de p et q.

**La compensation des harmoniques par le filtre actif se fait par la génération de ces dernières :**

$$p^* = \tilde{p}, \quad q^* = \tilde{q}$$

- En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale s'effectue à l'aide de deux filtres passe-bas de *Butterworth* d'ordre deux :

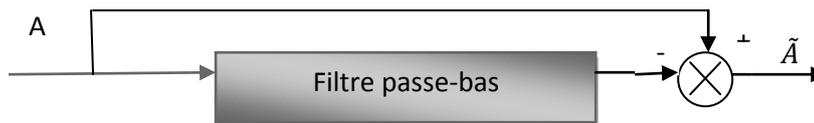


Figure 27 : Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q

- Les courants de compensation de référence se calculent par la formule suivante :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix}$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix}$$

Et voici le modèle du Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées

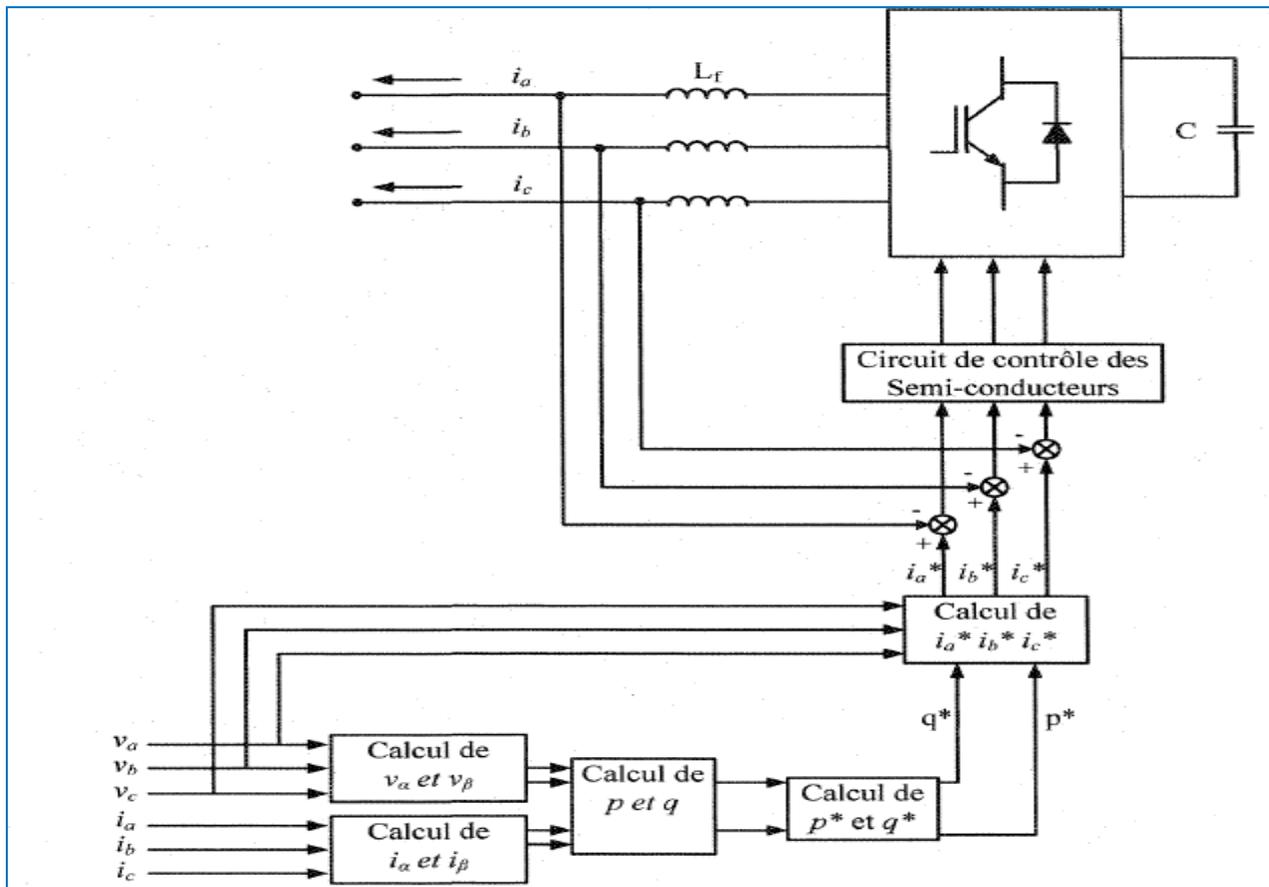


Figure 28 : Filtre actif commandé par la méthode des puissances instantanées

La méthode des puissances instantanées possède les quelques caractéristiques suivantes :

- Elle est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.
- Elle peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmonique).
- Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif.
- Méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard).

## 2.2 Contrôleur des courants de référence

Les performances de compensation d'un filtre actif avec réduction du THD du courant source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la technique du contrôle des courants de référence (poursuite des courants de références). Ces signaux de contrôle sont obtenus à partir des signaux de compensation des harmoniques que nous avons vus dans la section précédente.

Une grande variété d'approches comme celle de l'hystérésis, la modulation en largeur d'impulsion (MLI), la modulation vectorielle dans l'espace, etc., sont des méthodes permettant le contrôle des semi-conducteurs du filtre actif.

### 2.2.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

La MLI naturelle est la méthode la plus simple et la plus fréquemment utilisée. Elle consiste à comparer, à chaque instant, le courant de référence avec un signal triangulaire appelé porteuse. La fréquence de ce signal doit être élevée devant celle de la référence et son amplitude supérieure à celle de la référence, chaque intersection entre ces deux signaux donne lieu à une commutation.[7]

- Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence.
- L'erreur à la sortie des régulateurs est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs comme il est présenté dans la Figure 29 :

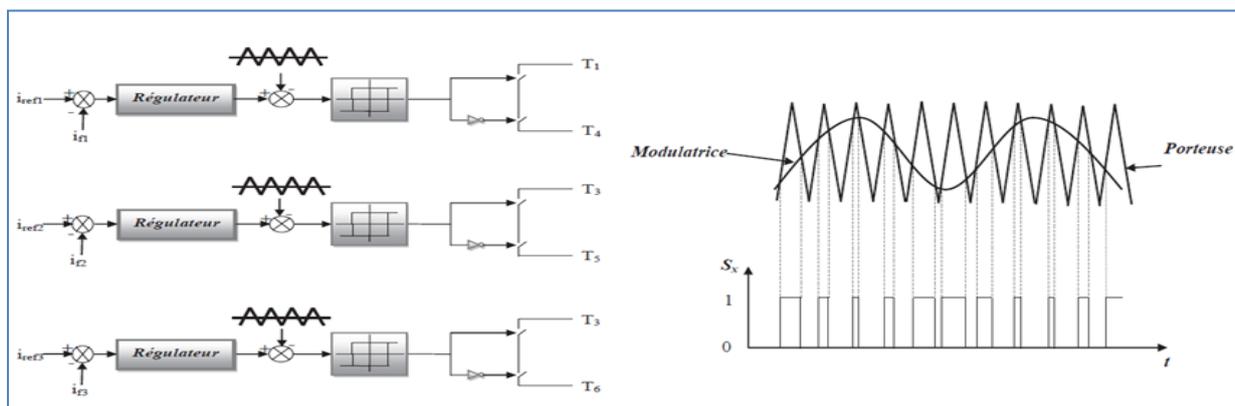


Figure 29 : Principe de commande des courants par MLI

## II. Structure de base d'un STATCOM

### 1. Principe de fonctionnement d'un STATCOM

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés.

Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue.

Il est composé d'un convertisseur de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT) associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau par le biais d'un transformateur de couplage.

L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau.[14]

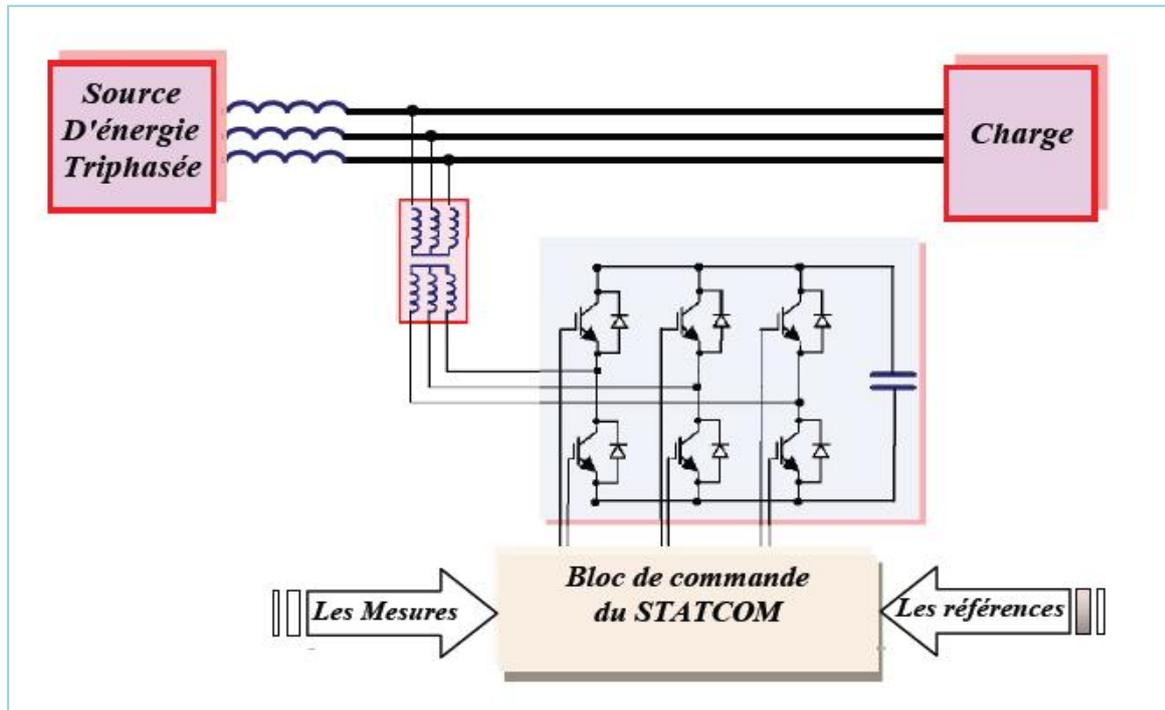


Figure 30 : structure de base d'un STATCOM couplé au réseau

En général la tension du STATCOM  $V_{sh}$  est injectée en phase avec la tension  $V_t$  de la ligne, dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM.

Le schéma équivalent de ce dispositif avec le système énergétique (source, ligne et charge) est donné par :

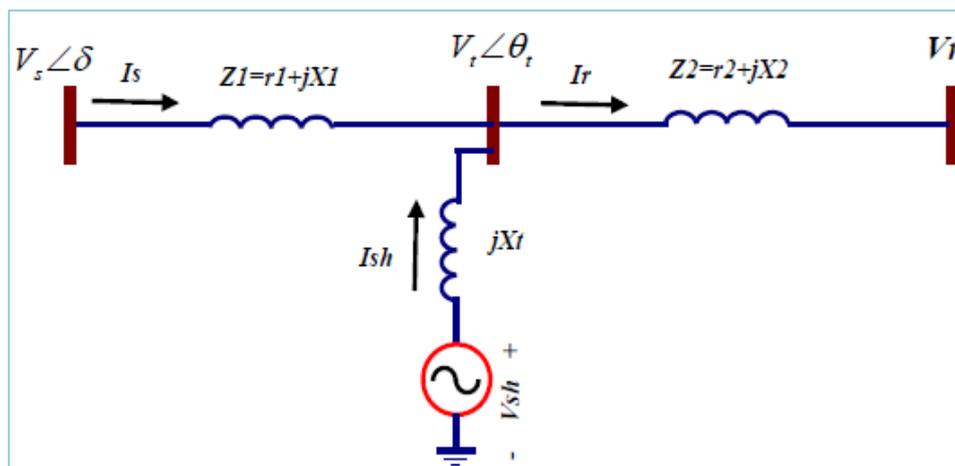


Figure 31 : schéma du STATCOM couplé au réseau

- Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$\bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t}$$

- La puissance injectée au jeu de barre " t " est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S} = \bar{V}_t \bar{I}_{sh}^* = \frac{\bar{V}_t (\bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^*)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \cdot \bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^2}{-jX_t}$$

- D'où on abouti aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre " t " exprimées par les formules suivantes: [14]

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \frac{\sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t}$$

$$Q_{sh} = V_{sh} \frac{(V_{sh} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t)}{X_t}$$

- Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau. Donc

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \frac{\sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t} = 0$$

- D'où la condition:

$$\theta_t - \theta_{sh} = 0 \quad \theta_t = \theta_{sh}$$

- D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM  $V_{sh}$  doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement.
- Comme les tensions  $V_{sh}$  et  $V_t$  sont en phase, le courant  $I_{sh}$  du STATCOM en quadrature avec la tension  $V_t$ , est donc un courant réactif son amplitude et sa puissance réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations suivantes :

En admettant que la tension  $V_{sh}$  est sur l'axe d (comme référence des phases) :

$$V_{shd} = V_{sh} ; V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t}$$

$$Q_{sh} = V_{sh} I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right)$$

- A partir de la dernière équation, il parait claire que :
  - Si le module de la tension du STATCOM  $V_{sh}$  égale le module de la tension  $V_t$  du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.
  - Si  $V_{sh} > V_t$ , donc  $Q_{sh} > 0$ , le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau,
  - Et si  $V_{sh} < V_t$ , donc  $Q_{sh} < 0$ , le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif.

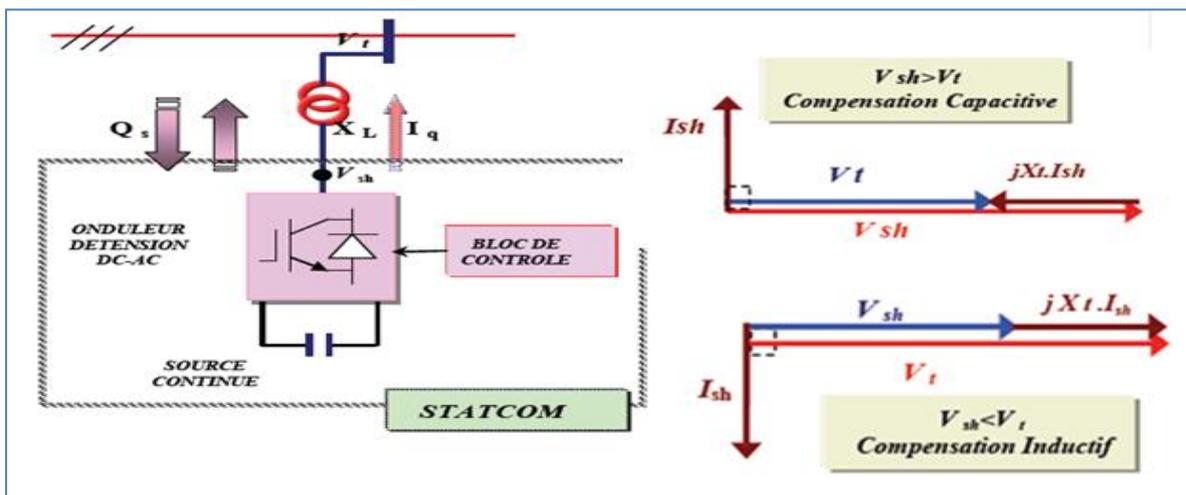


Figure 32 : fonctionnement du STATCOM en mode capacitif et inductif

**NB:** La puissance nominale du STATCOM dépend de la puissance réactive demandée pour la compensation au point de connexion. Le calcul de la répartition de charge (écoulement de puissance) détermine la tension du jeu de barre à réguler et la quantité de la puissance réactive nécessaire pour atteindre cet objectif.

## 2. Modélisation du STATCOM

Le schéma équivalent de STATCOM : [15]

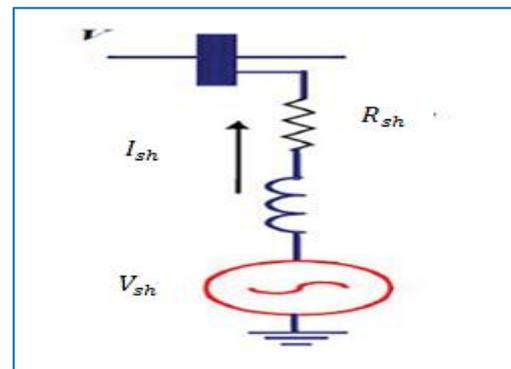


Figure 33 : schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau

Le modèle simplifié du STATCOM est représenté par le schéma équivalent contenant une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance  $L_{sh}$  à travers un transformateur de couplage. Le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur.

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système  $V$  (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM. On appliquant la loi d'ohm on aura :

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh}\bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (A)$$

Où les grandeurs en triphasé sont :

$$V = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad V_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \quad I_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{bmatrix}$$

Après simplification de calcul, les équations dynamiques du STATCOM dans le repère (d, q) sont les suivantes [14] : (voir l'annexe)

$$V_d - V_{shd} = R_{sh}I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq}$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh}I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \cdot \omega I_{shd}$$

Le système d'état du STATCOM sous forme matricielle est:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$$

Où le vecteur  $\begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$  représente le vecteur de commande du système.

### 3. Contrôle du STATCOM

Dans la totalité des applications pratiques le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquence maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant  $I_{sh}^*$ , qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants  $(I_{shd}^*, I_{shq}^*)$  sont donc les grandeurs de références du STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées.[16]

### 3.1. Détermination des Références:

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive  $Q_{shd}^*$  calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active  $P_{sh}^*$ , représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur.

Ces puissances qui sont les images des courants  $(I_{shd}^*, I_{shq}^*)$  active et réactive qu'on détermine depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) : [16]

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{shd}^* \\ Q_{shq}^* \end{bmatrix}$$

Où: les tensions  $V_d$  et  $V_q$  sont les tensions du jeu de barre.

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure suivante :

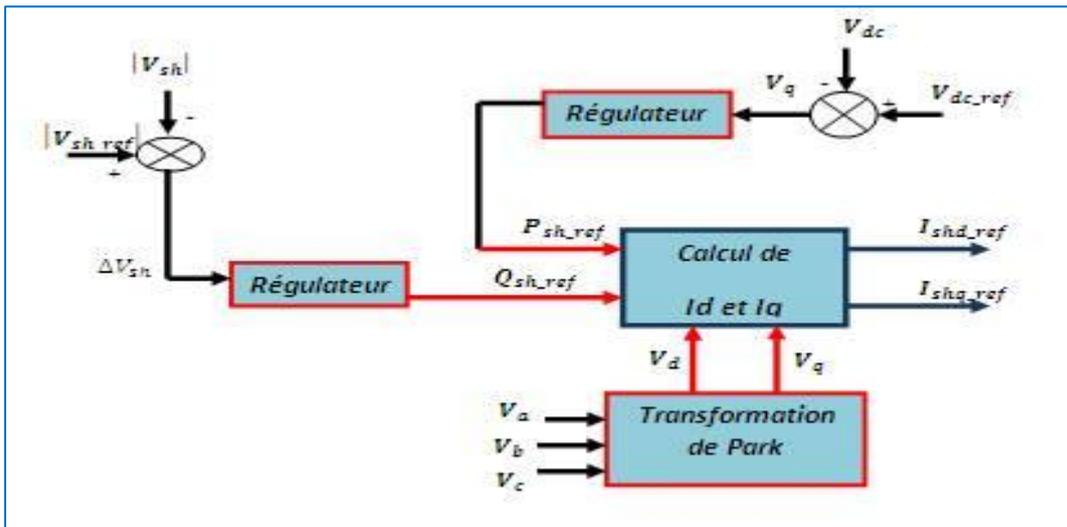


Figure 34 : Identification des courants de référence

### 3.2. Méthode Watt-Var découplée :

Cette méthode consiste à contrôler les puissances active et réactive indépendamment en forçant les courants correspondants à suivre des courants de référence. [16]

Considérant le modèle simplifié représenté par le système suivant:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$$

Sur le vecteur de commande on effectue le changement de variable suivant :

$$\frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$$

Alors les nouvelles grandeurs de commande sont :

$$\begin{cases} X_1 = \frac{1}{L_{sh}} (V_d - V_{shd}) \\ X_2 = \frac{1}{L_{sh}} (V_q - V_{shq}) \end{cases}$$

A partir de système du STATCOM, on aura :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega I_{shq} + X_1$$

$$\frac{dI_{shq}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shq} - \omega I_{shd} + X_2$$

Le schéma de régulation du STATCOM par la méthode Watt-Var découplée est représenté sur la figure 35: [15]

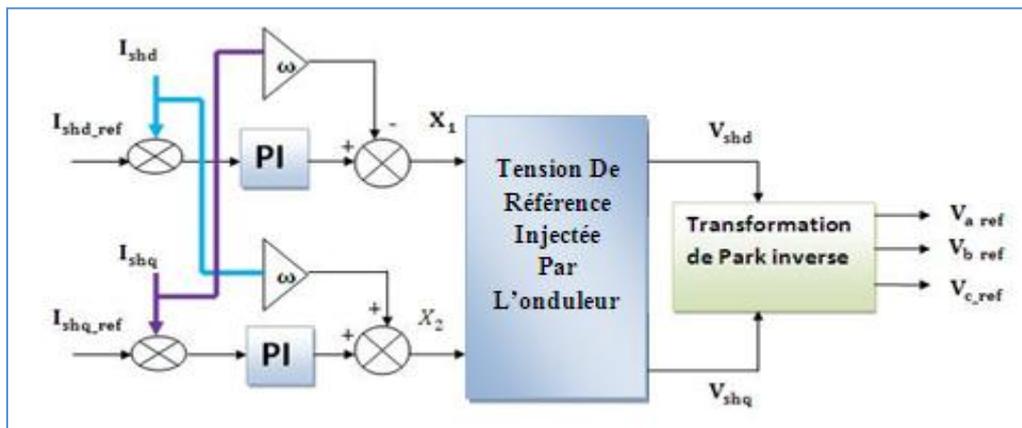


Figure 35 : schéma de régulation du STATCOM (watt-Var découplé)

Le schéma global de l'identification des références et de régulation du courant pour cette méthode est montré sur la figure 36:

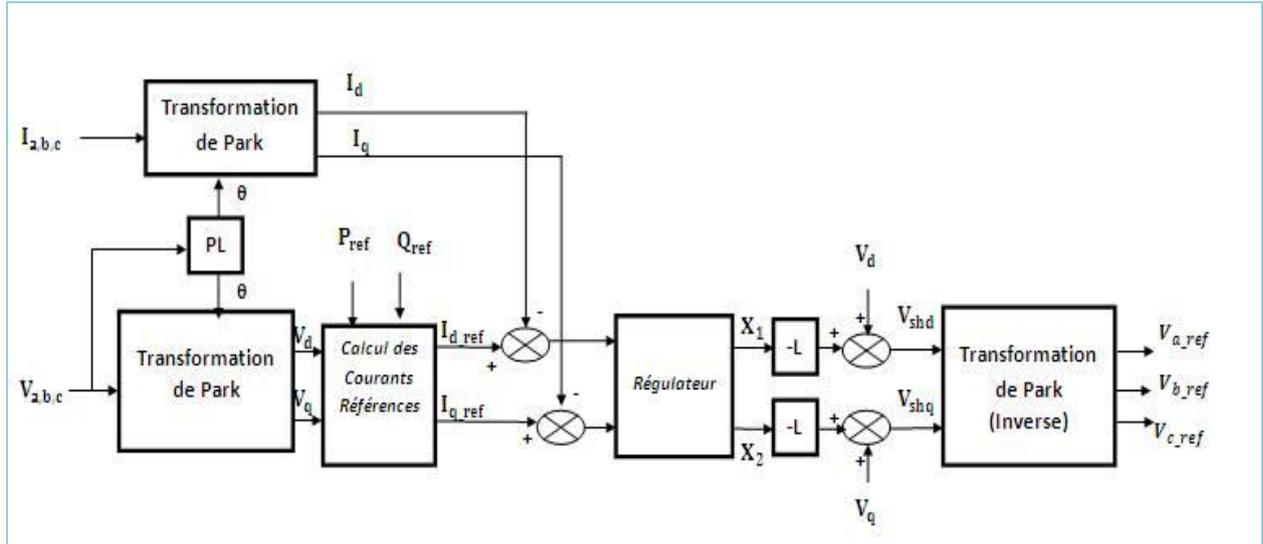


Figure 36 : Schéma global du contrôle par la méthode Watt-Var découplé

D'après cette figure, les composantes du courant sont comparées avec ses références. Les écarts entre elles, passent par les régulateurs. Les sorties des régulateurs donnent les composantes de la tension de référence de la MLI dans le repère d-q. Passant par la transformation inverse de Park, nous obtenons les références du signal de commande MLI des interrupteurs de l'onduleur.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des réseaux électriques des courants perturbateurs comme le courant harmonique, la partie puissance et la partie commande ont été présentés d'une manière détaillée. Nous avons présenté successivement l'onduleur de tension deux niveaux ainsi que l'élément de stockage et le filtre de sortie pour la partie puissance et la technique de commande de l'onduleur pour la partie commande. Ensuite, nous avons décrit la méthode de calculs des courants de référence pour l'élimination des courants harmoniques dans un réseau électrique qui est basée sur la transformation de Concordia pour le calcul des puissances réelles et imaginaires instantanées.

De même, nous avons présenté la structure de base du STATCOM, sa modélisation pour laquelle nous avons identifié les références de son système de commande. Ensuite, nous avons décrit l'algorithme de son contrôle par la Méthode de Watt-Var découplée.

## CHAPITRE V :

# LA SIMULATION DU FILTRE ACTIF PARALLELE / LE COMPENSATEUR SYNCHRONNE PARALLELE

---

## Chapitre V: la simulation du filtre actif parallèle/le compensateur synchrone parallèle

### Introduction :

Dans ce chapitre nous allons réaliser les différents étapes conduisant à la réalisation du filtre actif parallèle sous *Matlab simulink*. De même, la simulation de l'ensemble réseau, le FAP et le parc éolien afin de compenser les courants harmoniques générés.

De même, nous allons présenter la modélisation de STATCOM dont le rôle d'atténuer les fluctuations rapides de tension 'flicker' au point de raccordement par la compensation de l'énergie réactive, et la simulation de l'ensemble réseau, le STATCOM et le parc éolien. La méthode Watt-Var découplée sera implémenté numériquement sous MATLAB simulink

### I. Simulation du système éolien:

#### 1. Simulation du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. La variation de la vitesse du vent est la raison derrière la variation des puissances produites ou consommées par l'éolienne.

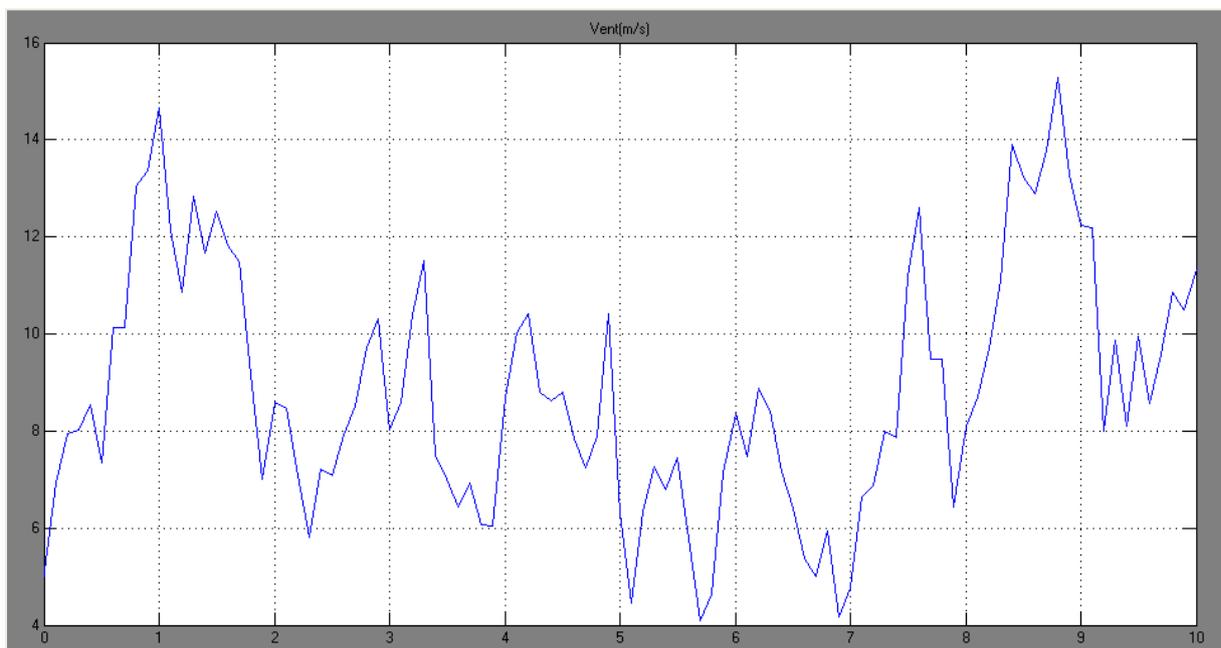


Figure 37 : la simulation du vent

La Figure ci-dessus montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (10s) entre deux valeurs ( $V_{max} = 15m/s$ ) comme valeur maximale et ( $V_{min} = 4m/s$ ) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

## 2. Simulation de parc éolien en fonctionnement normal

Le schéma de simulation du parc éolien de Taza établi sous l'environnement *Matlab/Simulink/SimPowerSystem* est le suivant:

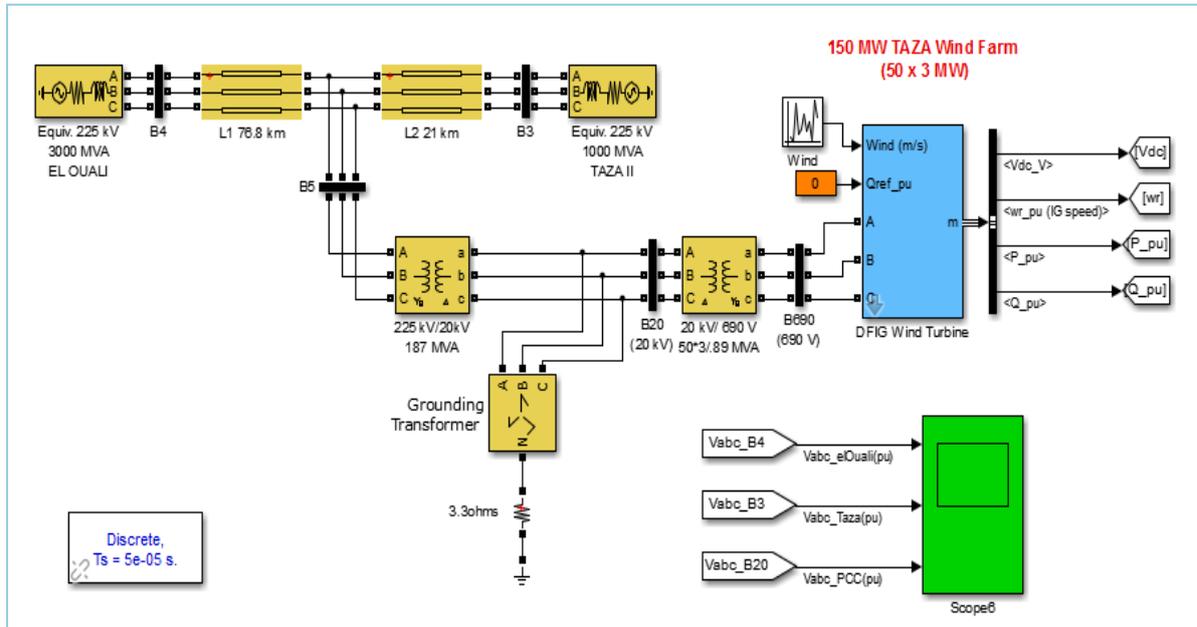


Figure 38 : le modèle du parc éolien en fonctionnement normal

Le parc est connecté au réseau électrique de Taza 225 kV à travers une ligne de distribution de 21 km de long, et au réseau *d'El Ouali* à travers une ligne de longueur 76,8km.

Comme nous avons dites précédent, la génératrice du parc est basé sur une machine asynchrone double alimentation, son schéma *sous Matlab/Simulink/SimPowerSystem* est le suivant :

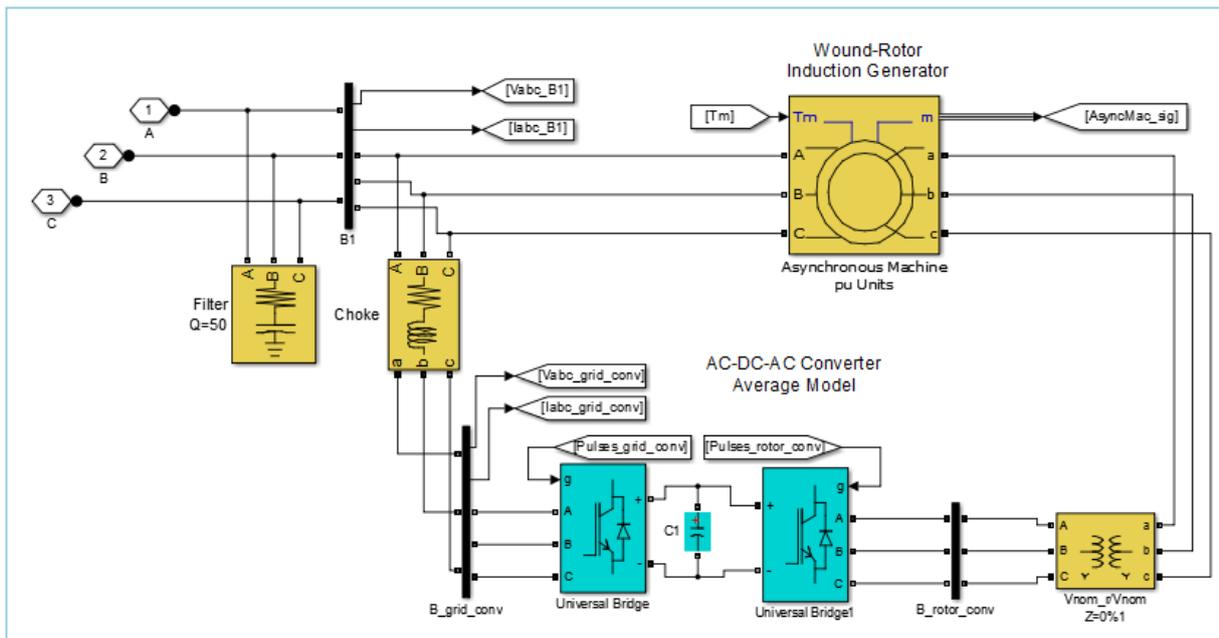


Figure 39 : la génératrice du parc éolien

Les paramètres de ce modèle sont les suivants :

- *EL Ouali* : la puissance de court-circuit est  $P_{cc} = 3000 \text{ MVA}$
- Parc de TAZA : la puissance de court-circuit est  $P_{cc} = 1000 \text{ MVA}$
- Le jeu de barre B20 (**point de raccordement commun PCC**) :  $P_{cc} = 1800 \text{ MVA}$
- La puissance nominale :  $P = 150/0.89 = 168 \text{ MVA (entre phase)}$ .
- La tension efficace:  $V_{eff} = 20 \text{ KV}$

Tous les paramètres de ce modèle est représenté également en pu (per unit : est une unité sans dimension c'est la grandeur physique divisé par sa valeur nominale)

La simulation du parc a donne comme résultat :

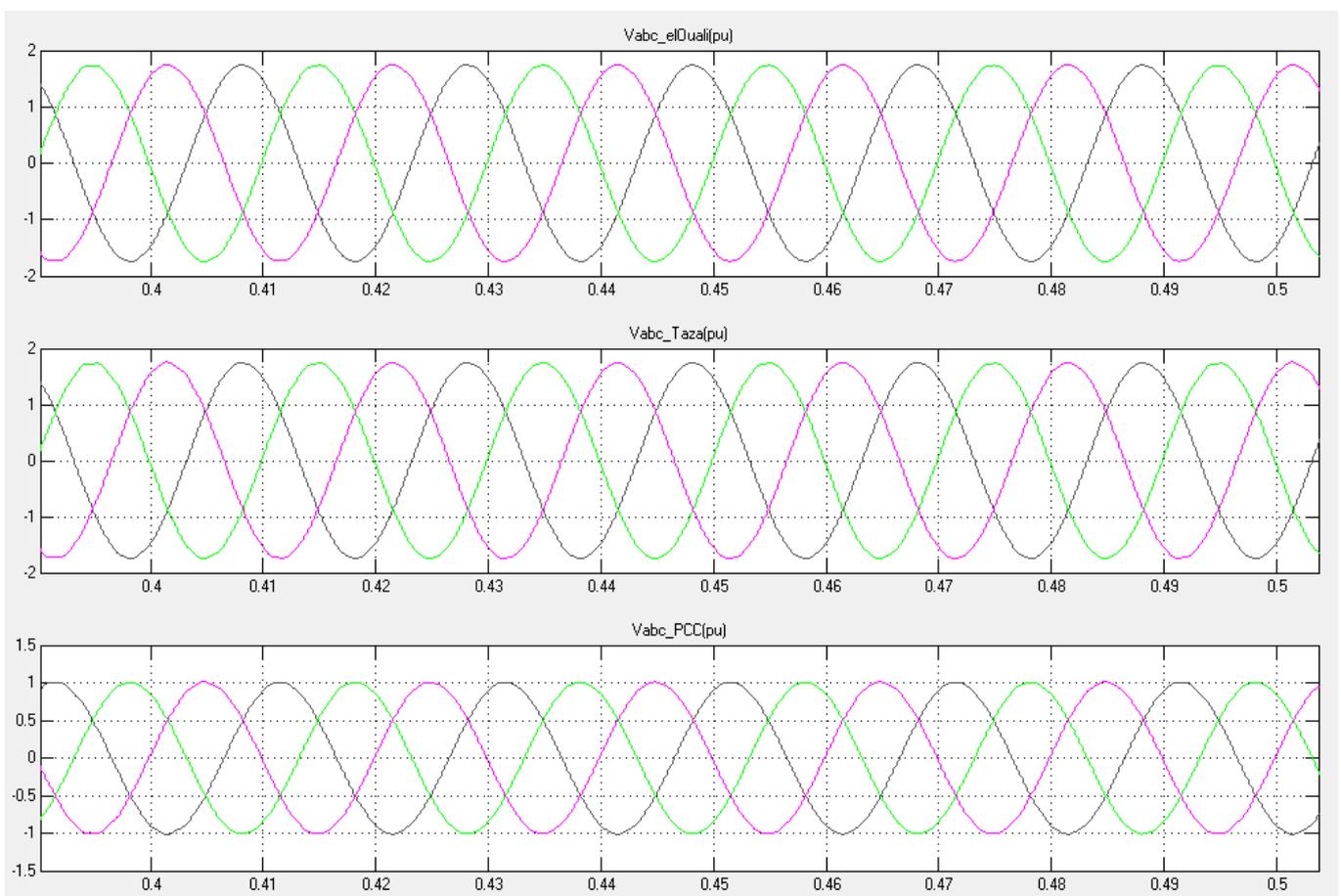


Figure 40 : la simulation du parc éolien

## II. La simulation des fluctuations des harmoniques

### 1. Le modèle de simulation :

Le modèle de simulation est représenté par le schéma suivant :

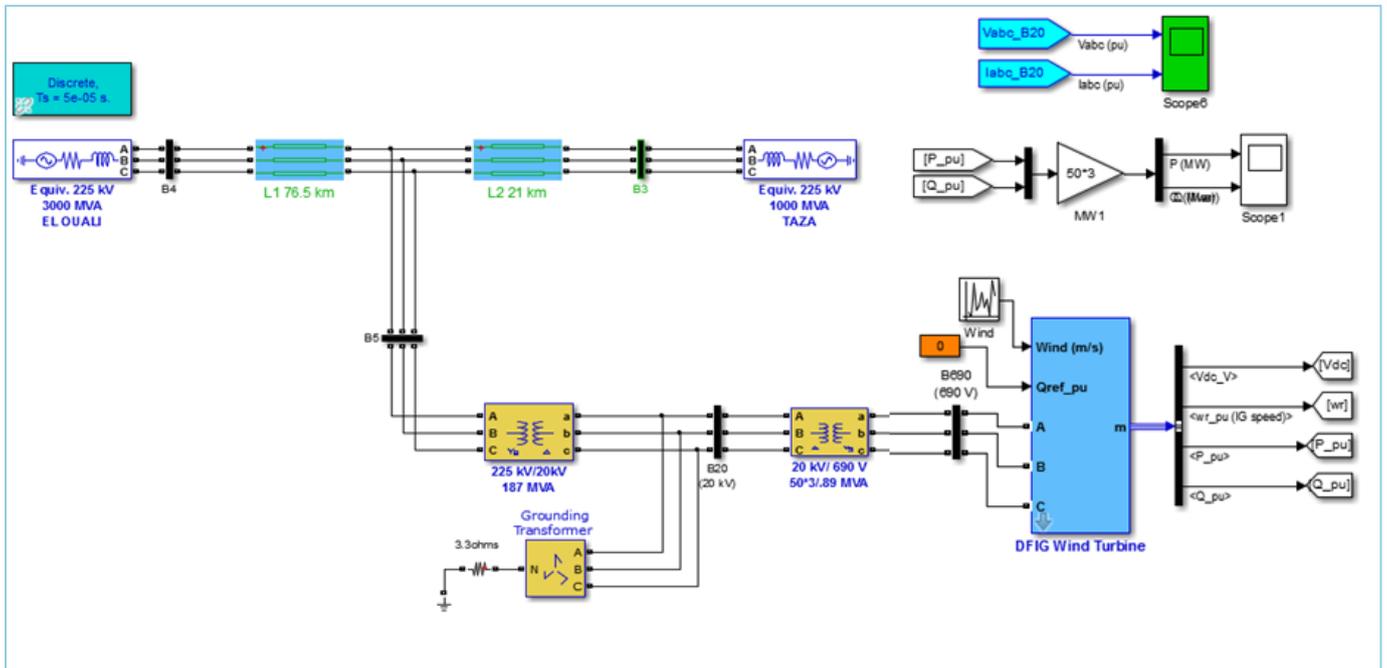


Figure 41 : Le modèle du système simulé

La tension et le courant au point PCC ont la forme suivante:

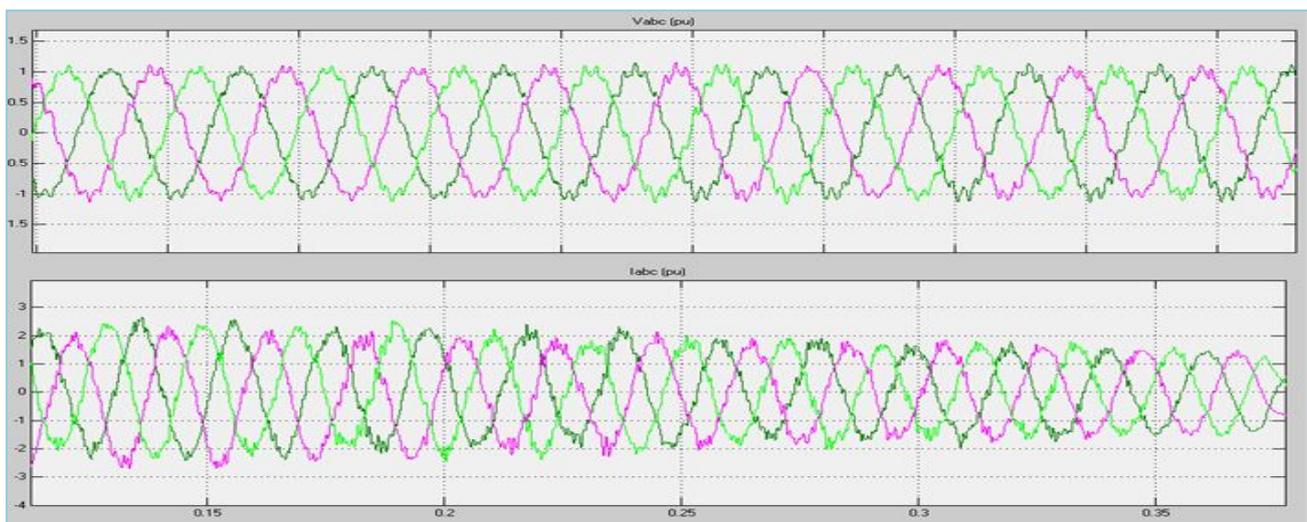


Figure 42 : Vabc et Iabc au point PCC

L'outil « *Powergui FFT Analysis Tool* » de *Matlab* est utilisé pour évaluer les niveaux d'harmoniques d'un signal et le pourcentage de la THD.

**Le spectre harmonique de la tension du parc au PCC en fonctionnement nominal :**

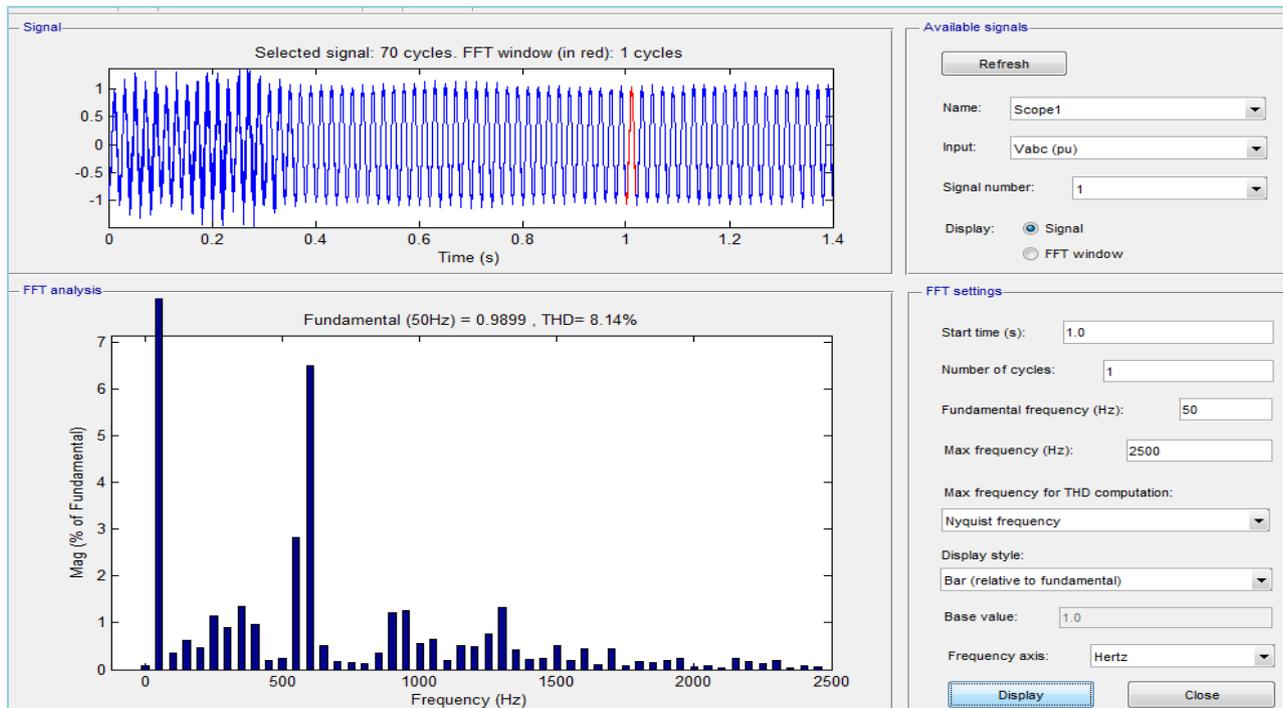


Figure 43 : Allure de spectre harmonique de  $V_{abc}$  au PCC en fonctionnement nominal

**Le spectre harmonique de courant du parc au PCC en fonctionnement nominal :**

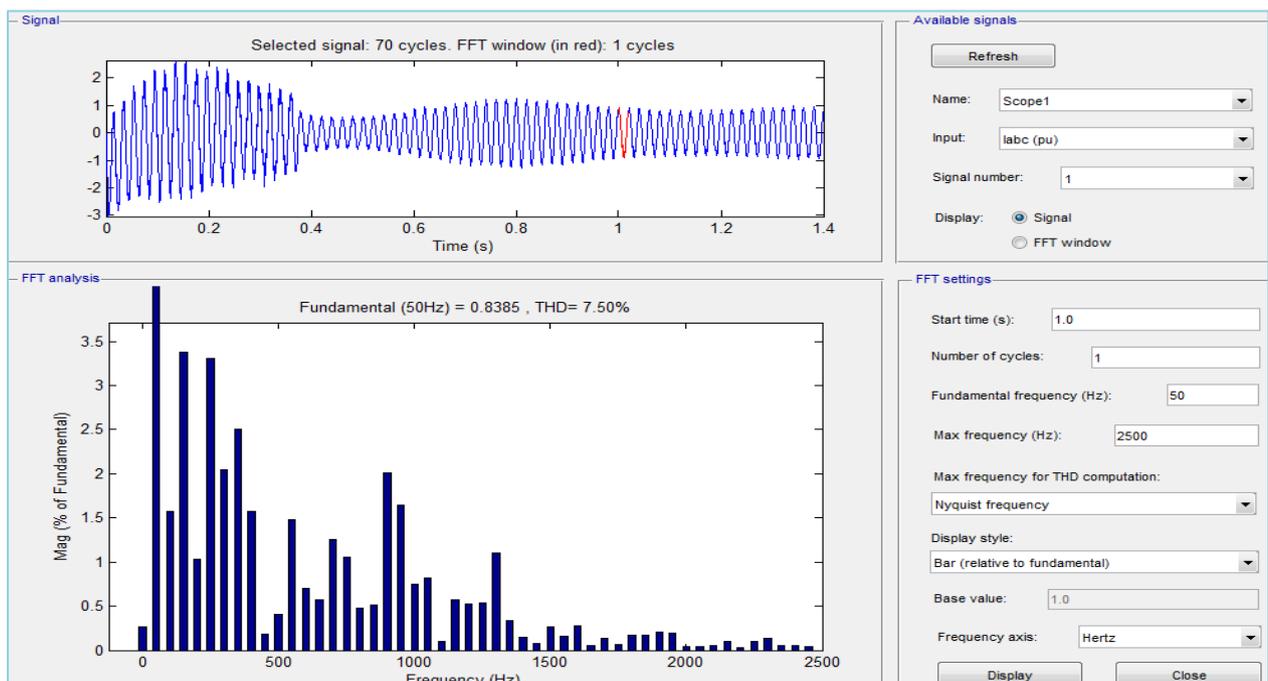


Figure 44 : Allure de spectre harmonique  $I_{abc}$  au PCC en fonctionnement nominal

### ✚ Interprétations :

On constat d'après les deux spectres :

- ✓ Le taux de distorsion harmonique de tension est : **THD=8.14%**  
On remarque qu'il est supérieur à 5%, il dépasse la limite acceptable qui est imposée par la norme C.E.I.61400.
- ✓ Le taux de distorsion harmonique de courant est : **THD=7.50%**  
On remarque qu'il est supérieur à 5%, il dépasse la limite acceptable qui est imposée par la norme C.E.I.61400.



D'où la nécessité d'avoir une solution convenable afin d'éliminer ces harmoniques, et avoir une valeur THD acceptable pour la tension, qui sera la compensation de ces harmoniques générés a partir de filtrage actif.

## 2. La modélisation de filtre actif parallèle sous matlab simulink :

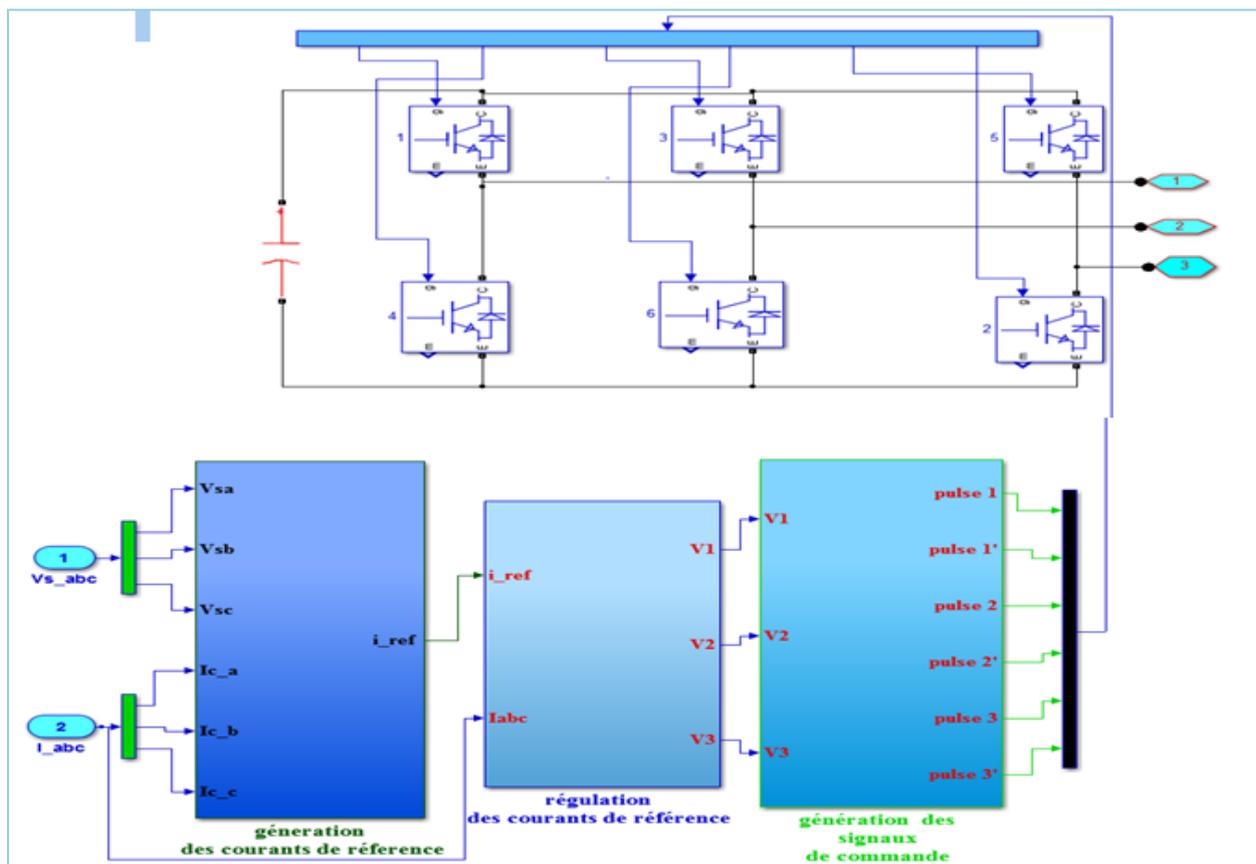


Figure 45 : la modélisation de filtre actif parallèle sous MATLAB

La structure de ce filtre actif parallèle se compose essentiellement de deux parties, une partie puissance et une partie commande.

➤ **La partie puissance :**

Elle se compose d'un onduleur de tension deux niveaux à base d'interrupteur de puissance (IGBT) avec une diode antiparallèle, d'un circuit de stockage d'énergie capacitif et d'un filtre de couplage à la sortie de l'onduleur.

➤ **La partie commande :**

Elle sert à contrôler la commutation des semi-conducteurs formant l'onduleur. Elle est constituée de l'algorithme de détection de courant de référence et de la commande de l'onduleur de tension.

La commande de l'onduleur de notre filtre actif parallèle se fait en trois étapes :

- a. Génération des courants de référence,
- b. La régulation des courants de référence,
- c. La génération des signaux de commande.

**2.1. Génération des courants de référence :**

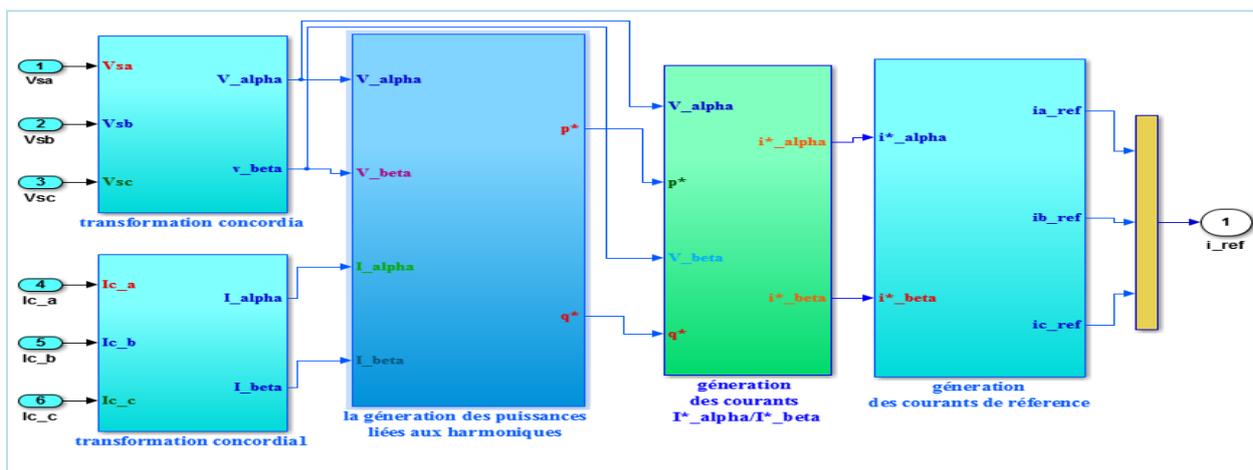


Figure 46 : Génération des courants de référence

La génération des courants de référence se fait en quatre étapes :

**2.1.1. La conversion du système triphasé en système biphasé :**

La première transformation de Concordia permet de calculer  $V_\alpha$  et  $V_\beta$  tel que :

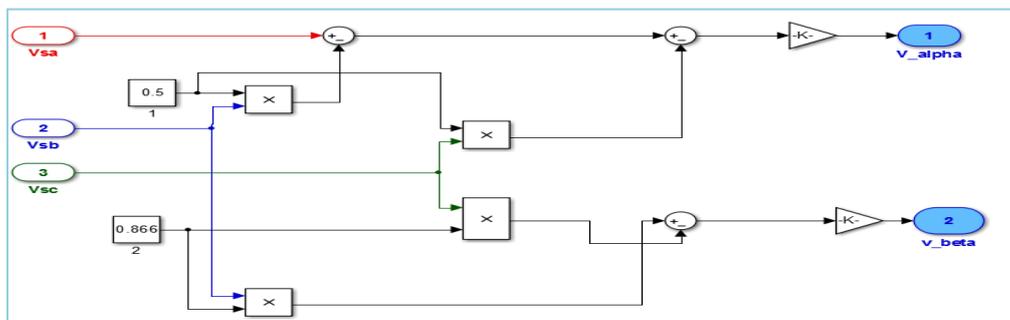


Figure 47 : conversion du système triphasé en système biphasé (a)

La deuxième transformation de Concordia permet de calculer  $I_\alpha$  et  $I_\beta$  tel que :

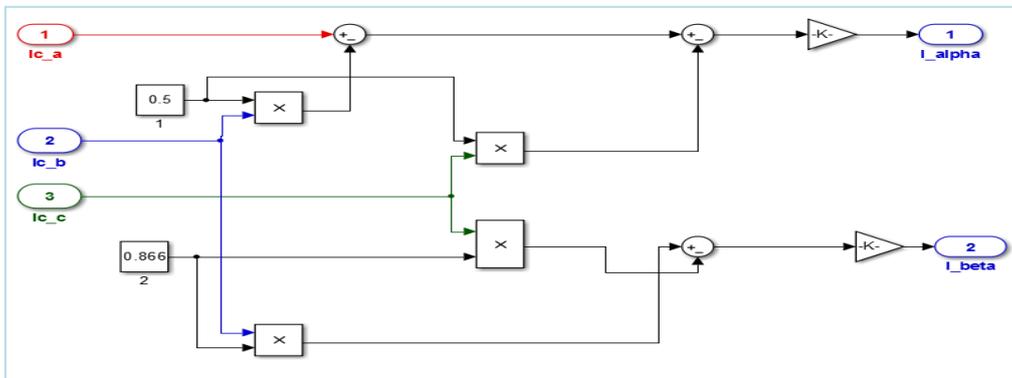


Figure 48 : La conversion du système triphasé en système biphasé (b)

### 2.1.2. La génération des puissances liées aux harmoniques

Le troisième sous –système permet de calculer la puissance réelle instantanée  $p$  et la puissance réactive instantanée  $q$ , tel que la compensation des harmoniques par le filtre actif se fait par la génération de ces dernières :

$$p^* = \tilde{p}, \quad q^* = \tilde{q}$$

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale s'effectue à l'aide de deux filtres passe-bas d'ordre deux :

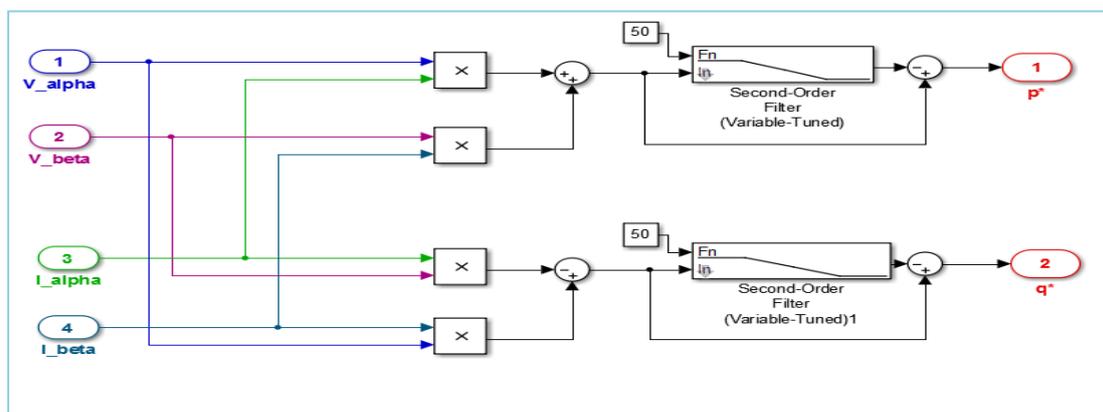


Figure 49 : La génération des puissances liées aux harmoniques

### 2.1.3. La génération des courants $I_{\alpha}^*$ et $I_{\beta}^*$

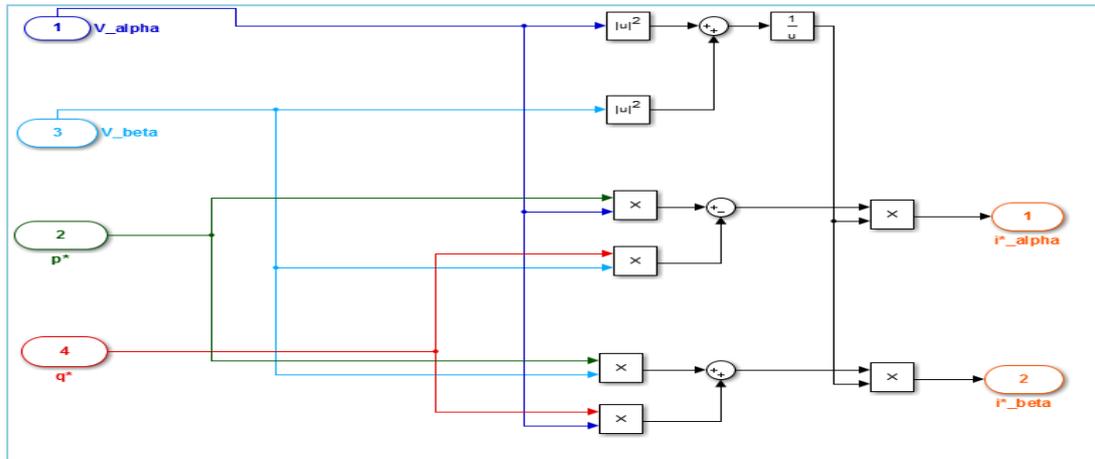


Figure 50 : La génération des courants  $I_{\alpha}^*$  et  $I_{\beta}^*$

### 2.1.4. Génération des courants de référence

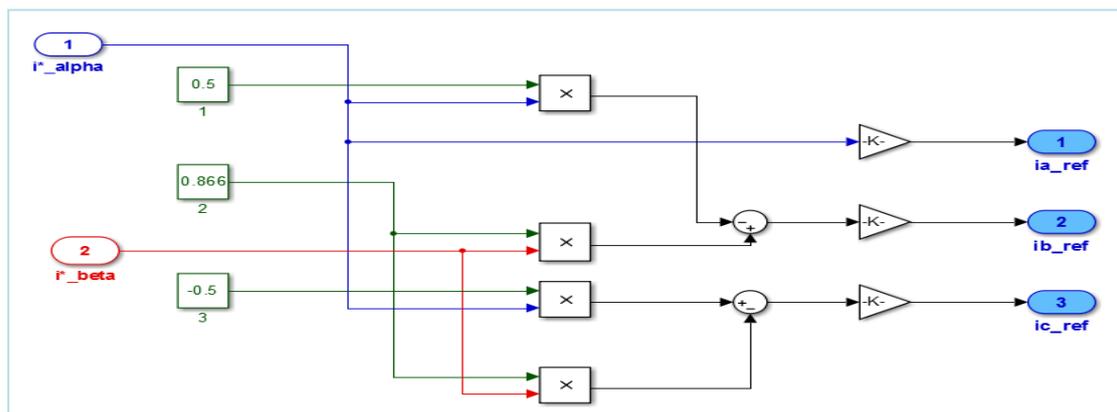


Figure 51 : Génération des courants de référence

## 2.2. Régulation des courants de référence :

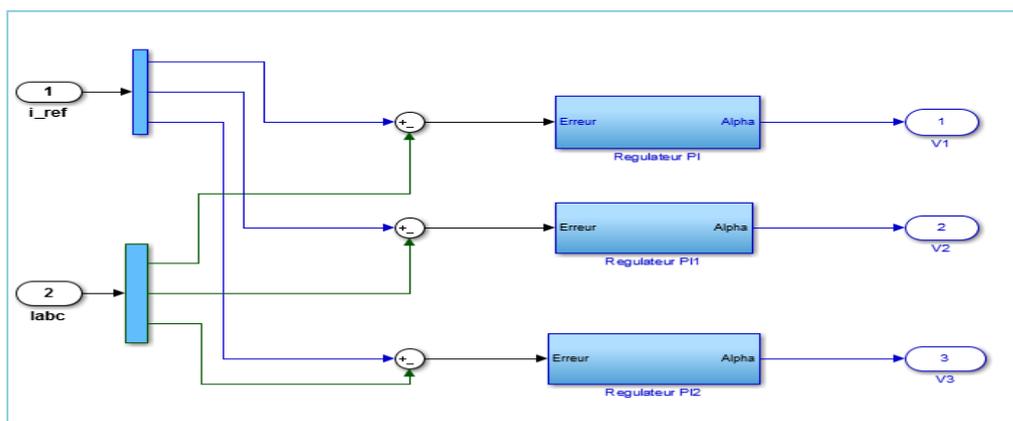


Figure 52 : la régulation des courants de référence

Le principe de fonctionnement de chaque régulateur PI est le suivant :

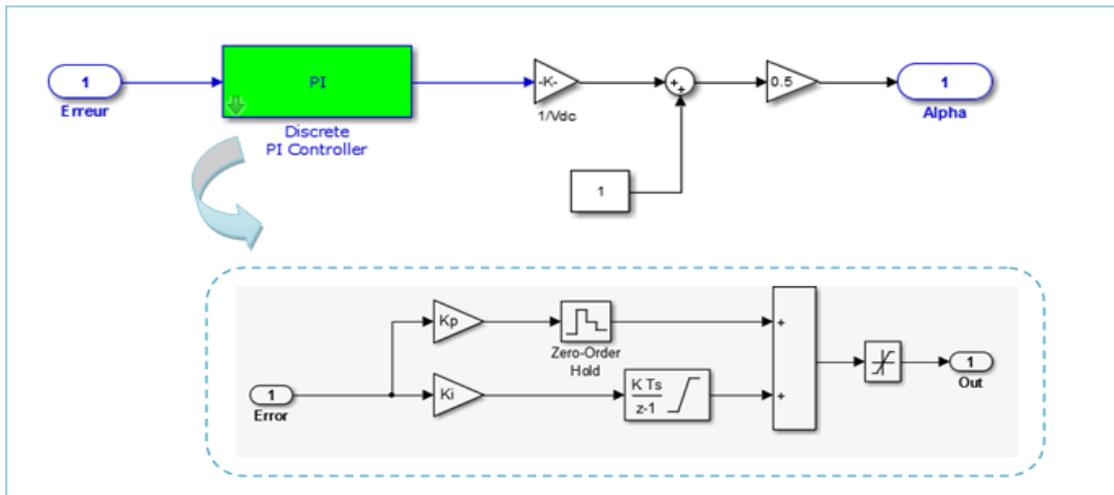


Figure 53 : le principe de fonctionnement de régulateur PI

### 2.3. Génération des signaux de commande :

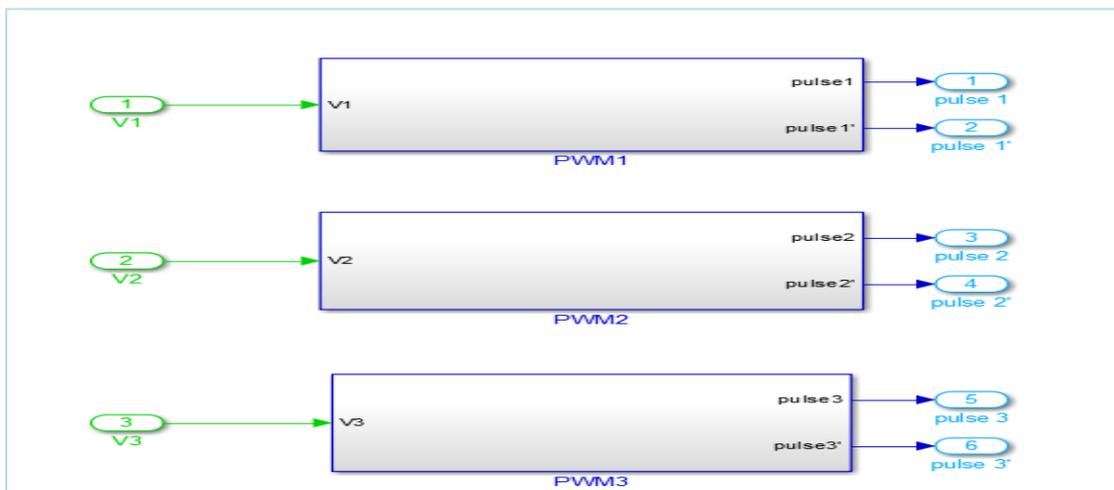


Figure 54 : la génération des signaux de commande

Le principe de fonctionnement de chaque PWM est comme le suivant :

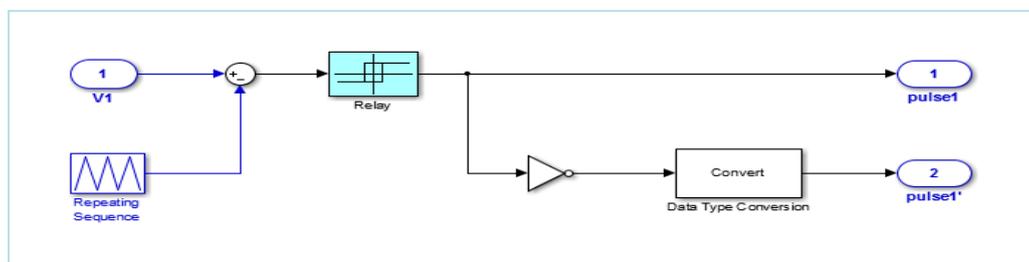


Figure 55 : le principe de fonctionnement de PWM

### 3. Le modèle de simulation avec le FAP :

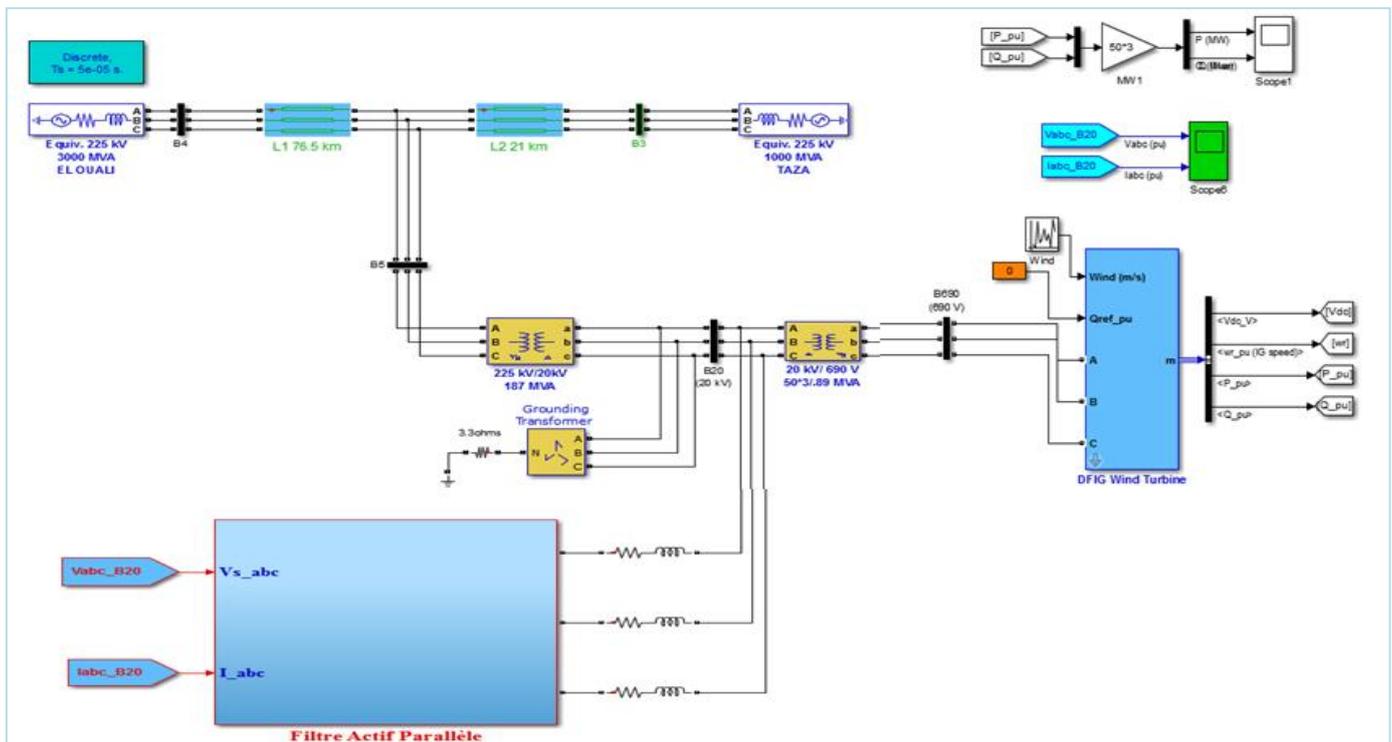


Figure 56 : Le modèle de simulation avec le FAP

#### 3.1. Dimensionnement des paramètres du système (réseau-filtre actif-charge polluante :

- Le système de stockage :  $Cdc$

Le choix des paramètres du système de stockage ( $Udc$  et  $Cdc$ ) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation des harmoniques.

- D'une part, une tension  $Udc$  élevée améliore la dynamique du filtre actif;
- d'autre part, une valeur élevée de  $Cdc$  réduit les ondulations mais augmente le coût et la taille du FAP.

De plus, les ondulations de la tension continue  $Udc$ , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $Cdc$ , ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible.

Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. La méthode la plus simple est basée sur la mesure du courant harmonique  $Ih$  du rang le plus faible.

La valeur de la capacité  $Cdc$  peut être déduite de l'équation : [6]

$$C_{DC} = \frac{Ih}{\epsilon \cdot V_{DC} \cdot \omega}$$

Où :

**$Ih$** : L'amplitude du courant harmonique le plus faible à compenser.

$\epsilon$ : Le taux d'ondulation de la tension, généralement égal à 5%.  
 $\omega$ : La pulsation fondamentale ( $2 * \pi * f$ ).

La tension redressée par le redresseur constituée des diodes mises en antiparallèle avec les IG BTS est donnée par :[6]

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6} V_{eff}}{\pi}$$

La tension de référence doit être légèrement supérieure à  $V_{dc}$  que le filtre puisse débiter sur le réseau.

- **Le filtre de couplage :RL**

Le réseau a pour puissance apparente nominale  $S_n$  et tension efficace simple  $V_n$  (la tension efficace composée  $U_n = \sqrt{3} V_n$ ).

L'impédance nominale du réseau est donnée par :

$$Z_n = \frac{U_n^2}{S_n}$$

L'impédance  $Z_{cc}$  du court-circuit du réseau est généralement égale à 25%  $Z_n$ , cette impédance exprimée en forme complexe nous donne :

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega$$

La résistance de court-circuit a pour valeur 10% de la réactance du court-circuit  $L_{cc}\omega$ , on trouve :

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega = R_{cc} + j10.R_{cc} = R_{cc}(1 + j10)$$

En module :

$$|Z_{cc}| = \sqrt{101} R_{cc} \quad \Rightarrow \quad R_{cc} = \frac{1}{\sqrt{101}} |Z_{cc}|$$

et par la suite :

$$L_{cc} = 10 \cdot \frac{1}{\omega\sqrt{101}} |Z_{cc}|$$

les simulations montrent que pour obtenir une bonne THD et une meilleure dynamique  $Z_f$  doit varier entre 2 et 8 fois  $Z_{cc}$  :

$$Z_f = 4 \cdot Z_{cc} = R_f + jL_f\omega$$

On déduit finalement que les expressions donnant les paramètres de filtre concernant l'inductance L et la résistance R sont données par : [6]

$$R_f = 4 R_{CC} = 4 \frac{1}{\sqrt{101}} |Z_{CC}|$$

$$L_f = 4. L_{CC} = 4.10 \frac{1}{w\sqrt{101}} |Z_{CC}|$$

### Application numérique :

- La capacité de stockage :

On a:  $I_h = 1.5A$ ;

$w = 2 * \pi * 50$  ;

$V_{dc} = \frac{3*\sqrt{6}*V_{eff}}{\pi} = 46.79 KV$  ;

$\varepsilon = 5\% = 0.05$

Donc on trouve :

$$C_{DC} = 2.04\mu F$$

- L'inductance Lf :

On a trouvé que :  $L_f = 4. L_{CC} = 4.10 \frac{1}{w\sqrt{101}} |Z_{CC}|$

Avec :

$$Z_{CC} = 25\%. Z_n = 0.25 * \frac{U_n^2}{S_n}$$

Donc :

$$Z_{CC} = 0.25 * \frac{((20 * 10^3 * \sqrt{3})^2)}{168.54 * 10^6} = 1.78$$

Donc :

$$L_f = 4.10. \frac{1.78}{2 * \pi * 50 * \sqrt{101}} = 0.022H$$

- **La résistance  $R_f$  :** On a trouvé que :

$$R_f = 4 R_{CC} = 4 \frac{1}{\sqrt{101}} |Z_{CC}|$$

Avec :

$$Z_{CC} = 25\% \cdot Z_n = 0.25 * \frac{U_n^2}{S_n}$$

$$= 0.02 * \frac{((20 * 10^3 * \sqrt{3})^2)}{168.54 * 10^6} = 1.78$$

Donc :

$$R_f = 4 * \frac{1.78}{\sqrt{101}} = 0.7 \Omega$$

### 3.2. Les résultats de simulation :

- **La tension et le courant au point PCC:**

Les résultats obtenus au point PCC (point de raccordement commun) sont les suivants :

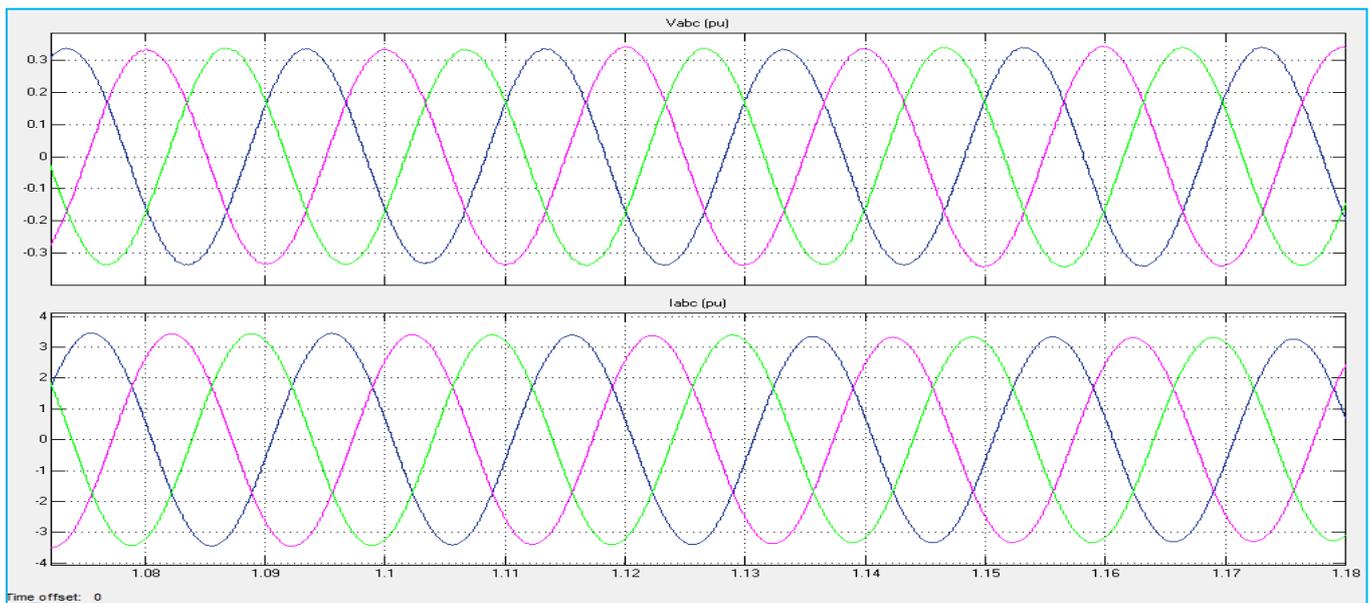


Figure 57 : Vabc et Iabc au point PCC

- Le spectre harmonique de la tension du (parc+FAP) au PCC :

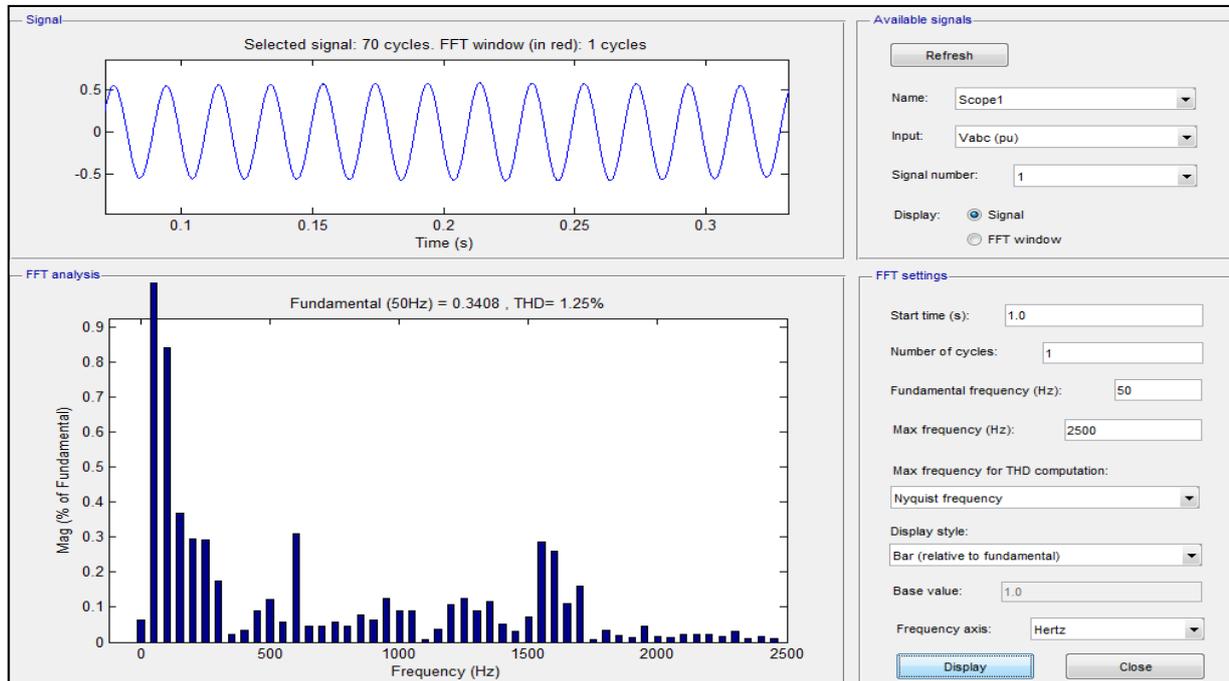


Figure 58 : le spectre harmonique de  $V_{abc}$  du (parc+FAP) au PCC

- Le spectre harmonique de courant du (parc+FAP) au PCC :

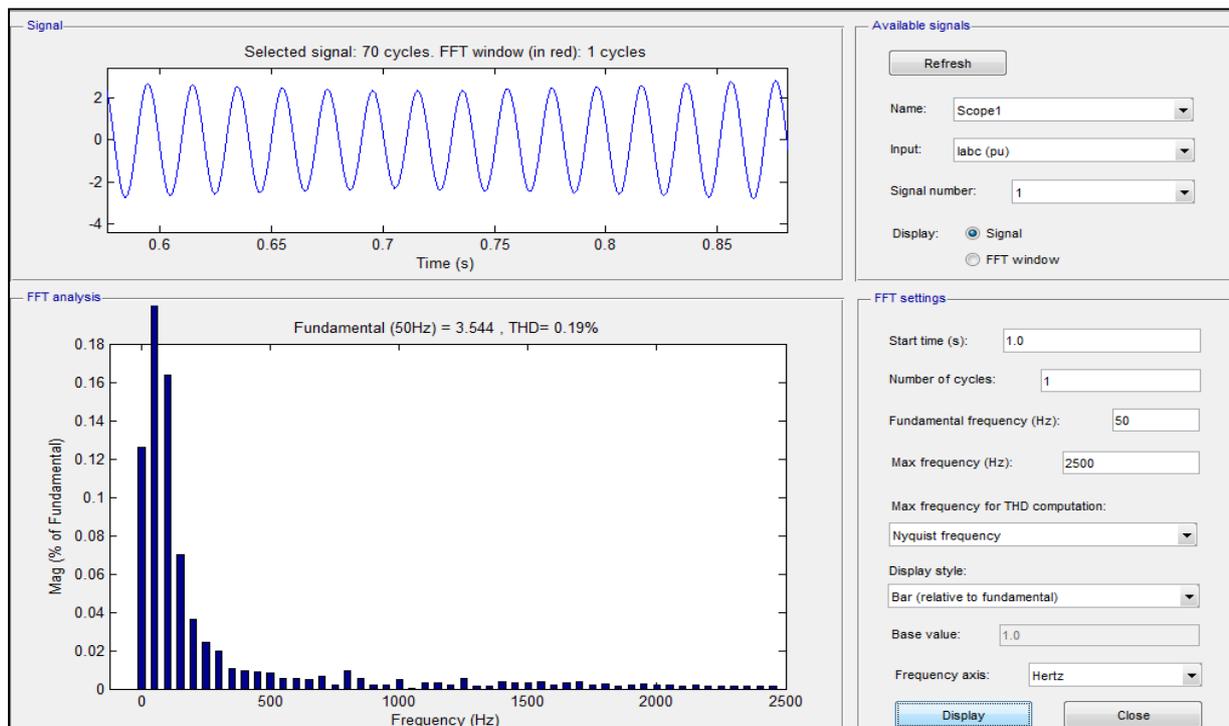


Figure 59 : le spectre harmonique de  $I_{abc}$  du (parc+FAP) au PCC

• **Interprétation des résultats :**

On constat d’après les deux spectres harmoniques :

- ✓ Le taux de distorsion harmonique en tension est : **THD=1.25%**
- ✓ Le taux de distorsion harmonique en courant est : **THD=0.19%**

On confirme que après le filtrage, le FAP a pu avoir les performances suffisantes afin d’éliminer les harmoniques, et d’avoir une valeur acceptable pour la THD concernant la tension  $V_{abc}$  et le courant  $I_{abc}$ , ce qui respecte bien la norme C.E.I.61400.

On remarque qu’une fois le filtre actif parallèle est mis en fonctionnement, le courant et aussi la tension au point de raccordement commun PCC sont désormais sinusoïdaux et libèrent toutes perturbations harmoniques.



Les résultats de simulation obtenus montrent les performances et l'efficacité du filtre actif parallèle sur la qualité de filtrage et bien évidemment sur la qualité de l’énergie électrique.

### **III. La simulation des fluctuations de Tension « «FLICKER » »**

#### **1. Calcul théorique du niveau d’émission de Flicker :**

##### **Dans le cas de simulation du parc éolien en fonctionnement normal :**

On considère l’équation suivante :

$$P_{It\Sigma} = P_{st\Sigma} = \frac{1}{S_k} \sqrt{\sum_{i=1}^{N_{wt}} (C(\psi_k, V_a) * S_n)^2}$$

L’émission de Flicker pour chaque point de mesure est présentée par le tableau suivant :

	$P_{It\Sigma} = P_{st\Sigma}$
<b>TAZA (<math>P_{cc} = 1000MVA</math>)</b>	<b>0.2352</b>
<b>PCC (<math>P_{cc} = 1800MVA</math>)</b>	<b>0.1306</b>
<b>EL OUALI (<math>P_{cc} = 3000MVA</math>)</b>	<b>0.0784</b>

**Tableau 5 : l’émission du flicker en fonctionnement normal**

Les facteurs de flicker obtenus sont inférieure aux limites ( $< 0.35$ ), ce qui respecte bien la norme CEI61 400-21. Plus la puissance de court-circuit augmente, plus l’émission de flicker diminue.

Alors, les résultats théoriques sont en conformité avec la simulation de modèle du parc éolien en fonctionnement normal (figure 40), d'où l'intégration du parc éolien de Taza ne pose pas le problème de Flicker.

**La simulation du parc éolien dans le cas de renforcement : L'effet de l'augmentation de la puissance nominale de parc :**

La puissance nominale du parc éolien est :  $P_n = 300MW$

Alors l'émission de Flicker pour chaque point de mesure devient :

	$P_{It\Sigma} = P_{st\Sigma}$
<b>TAZA (<math>P_{cc} = 1000MVA</math>)</b>	<b>3.147</b>
<b>PCC (<math>P_{cc} = 1800MVA</math>)</b>	<b>1.740</b>
<b>EL OUALI (<math>P_{cc} = 3000MVA</math>)</b>	<b>1.049</b>

Tableau 6 : l'émission du flicker dans le cas de renforcement

Les valeurs obtenues sont supérieures aux limites acceptables.

**Remarque :** on peut augmenter la puissance nominale du parc en ajoutant plus de turbines.

Dans ce qui suit, la valeur de la puissance nominale de notre Parc éolien sera prise égale à 300 MW (le phénomène du FLICKER).

**2. Le modèle de simulation :**

Le modèle de simulation en cas de renforcement est représenté par le schéma suivant :

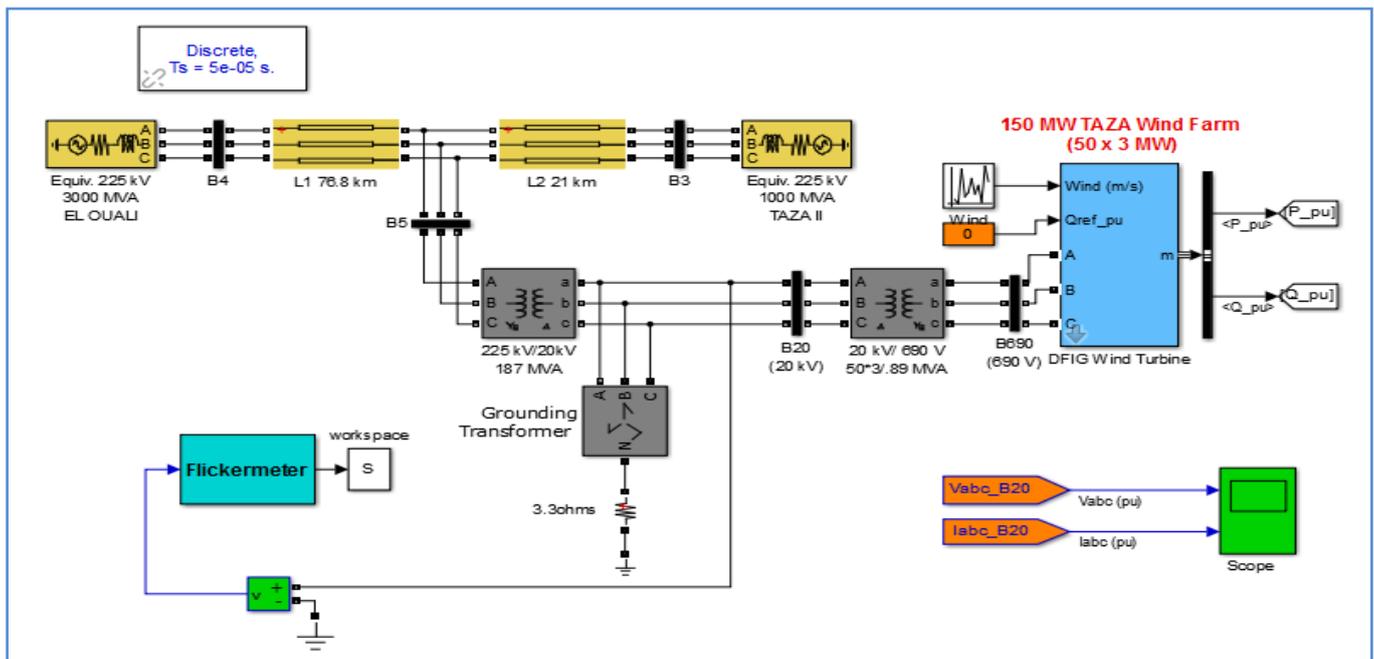


Figure 60 : Le modèle du système avec le Flickermètre

Les résultats de simulation au point de raccordement PCC sont:

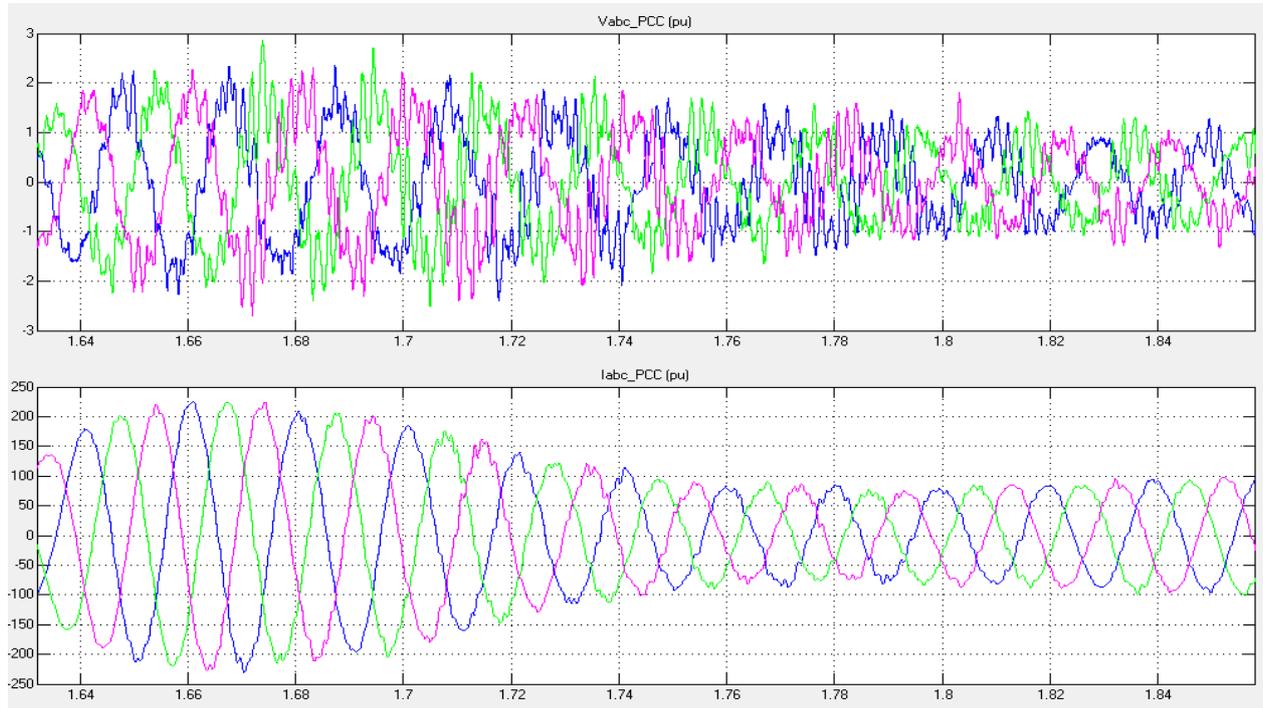


Figure 61:  $V_{abc}$  et  $I_{abc}$  au point PCC

Par l'appareil de Flickermètre, on trouve les résultats suivants (en fonctionnement établi) :

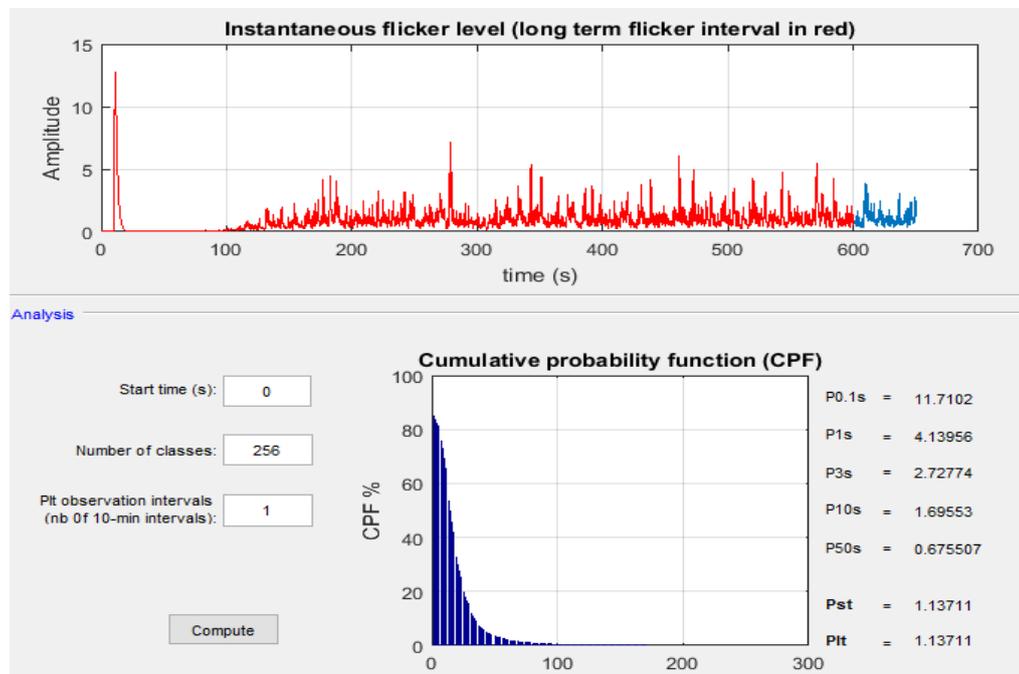


Figure 62 : les valeurs de sévérités d'une phase au point de raccordement

Le calcul de Pst se fait par l'équation suivante :

$$Pst = \sqrt{0.03140P_{0.1s} + 0.0525P_{1s} + 0.0657P_{3s} + 0.28P_{10s} + 0.08P_{50s}}$$

Alors, l'indice de perceptibilité Pst est la racine carrée de la somme pondérée de cinq quantiles.

### Interprétations :

- La comparaison entre les tensions en fonctionnement normal du parc éolien (figure40) et les tensions obtenues dans le cas de renforcement du réseau électrique (figure62) montre que l'augmentation de la puissance nominale du parc a un impact sur le réseau électrique dont les tensions sont devenues plus fluctuantes.
- Les résultats obtenus par l'appareil de Flickermètre sont presque identiques avec les résultats théoriques dont les indicateurs de sévérités Pst et Plt dépassent les limites acceptables d'émission de Flicker.

Pour atténuer ces fluctuations de Tension, on ajoute à notre modèle de la simulation un Statcom

### **3. La modélisation du STATCOM sous *matlab simulink*:**

Un STATCOM est constitué d'un onduleur de tension connecté au réseau au travers un transformateur de couplage. La structure de ce dispositif sous Matlab/Simulink/SimPowerSystem est la suivante :

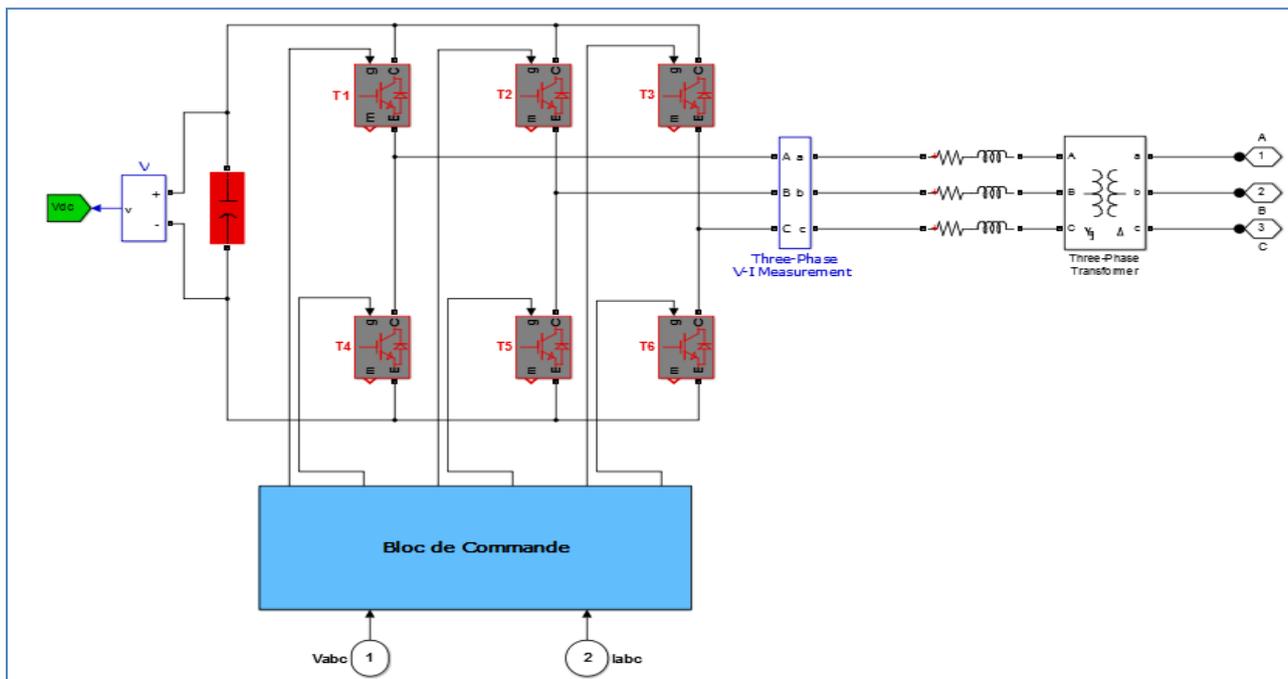


Figure 63: structure de Base du STATCOM

Le Bloc de commande du STATCOM se compose de quatre Sous-Blocs :

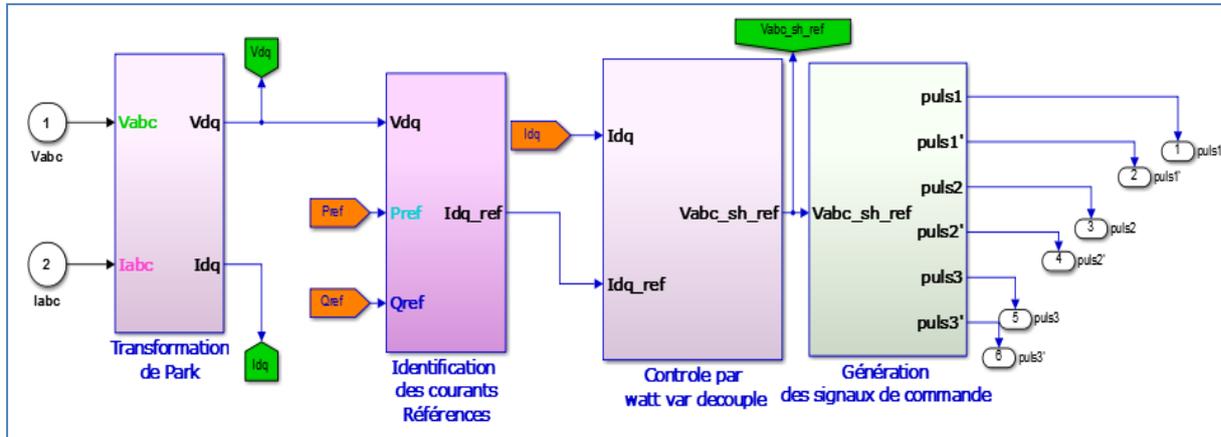


Figure 64: Bloc de Commande

### 3.1. Transformation de Park :

Le premier bloc concerne la transformation de Park qui permet le passage du système triphasé abc au système diphasé  $dq$ .

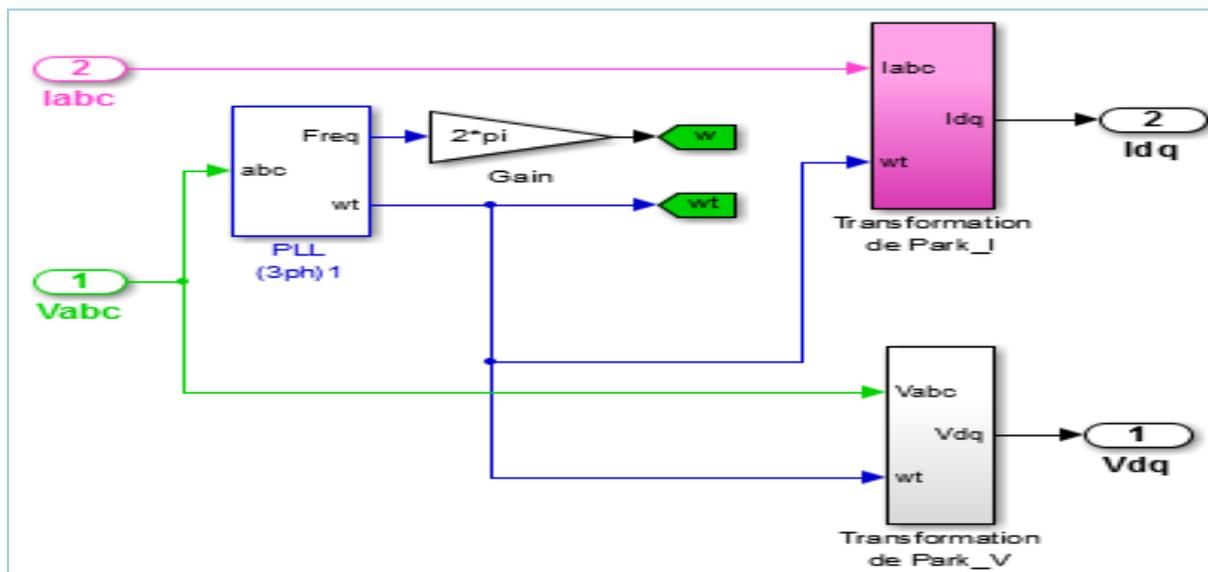


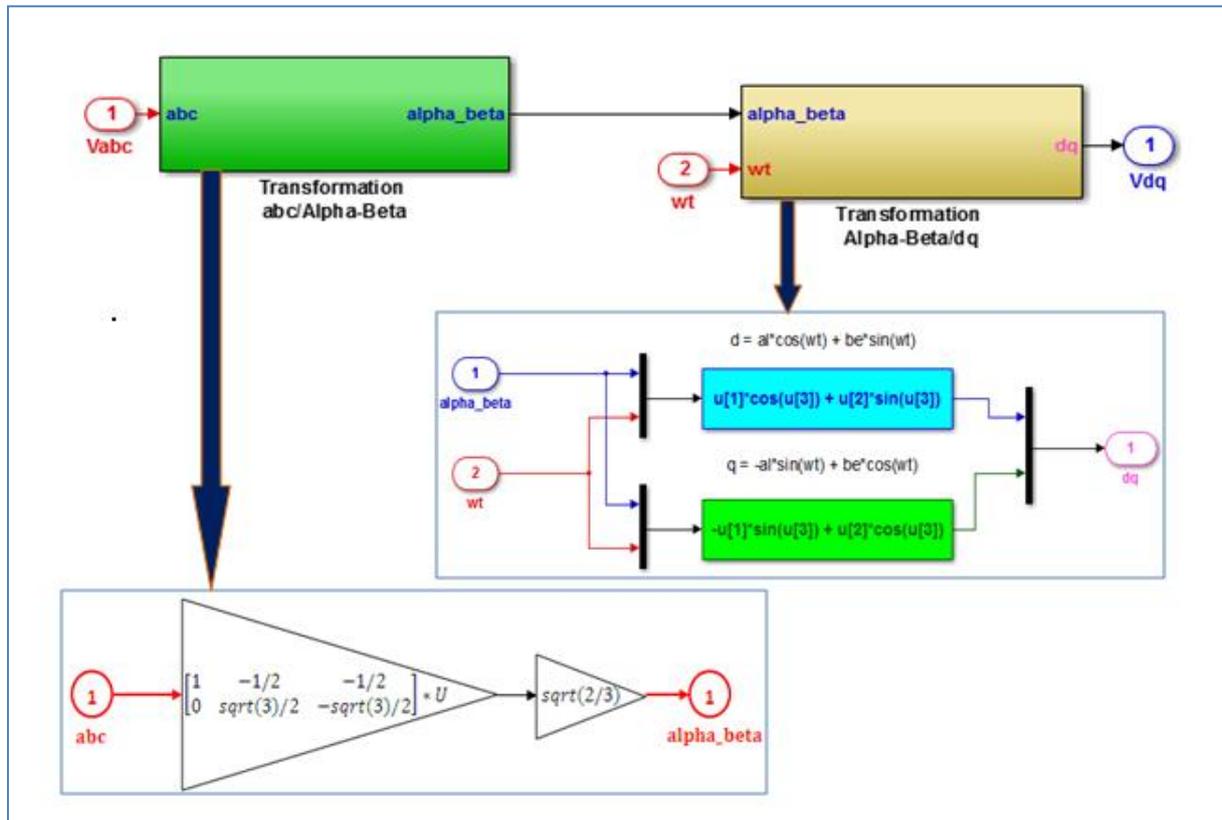
Figure 65: Transformation de Park ( $Vdq, Idq$ )

Ce bloc permet de transformer la tension et le courant au point de raccordement ( $Vabc, Iabc$ ) à un système diphasé ( $Vdq, Idq$ ).

Le bloc PLL (une boucle à verrouillage de phase) est utilisé pour synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau.

Le sous-système « Transformation de Park\_V » :

Figure 66 : la transformation de Park de Tension



La transformation de Park est constituée de deux transformations :

- une transformation de Concordia qui permet le passage du système triphasé (le repère  $(a, b, c)$ ) au système diphasé (le repère  $(\alpha, \beta)$ ),
- une transformation de rotation directe qui permet le passage du repère  $(\alpha, \beta)$  au repère  $(d, q)$ .

### 3.2 Identification des courants Références :

Les courants de références sont en fonction des puissances active et réactive injectent par l'onduleur et la tension au point de raccordement :

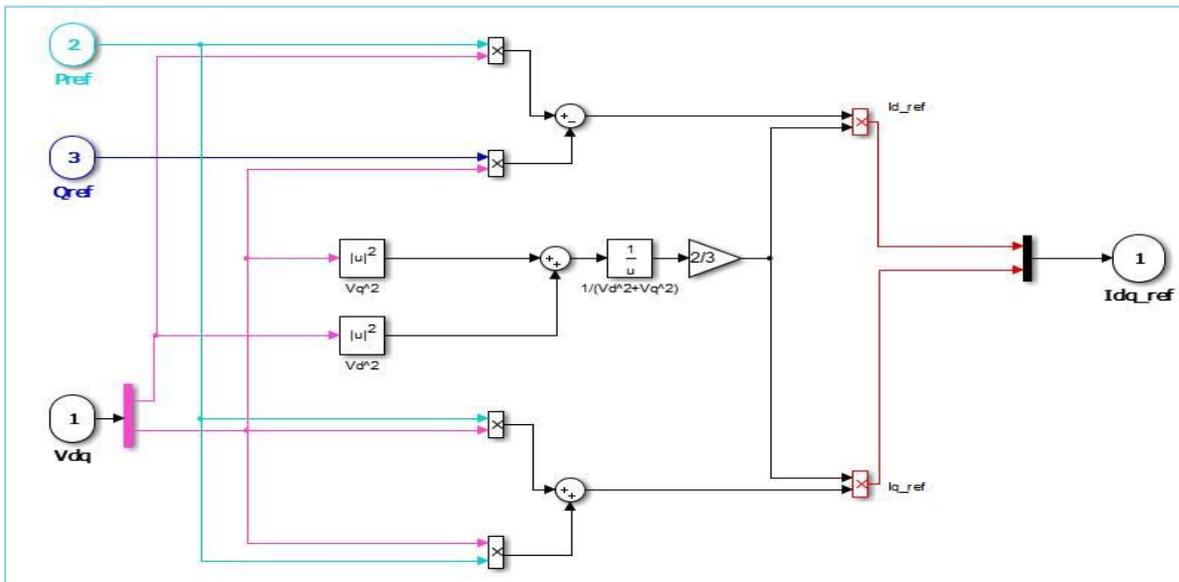


Figure 67: courants Références ( $I_{d\_ref}, I_{q\_ref}$ )

Avec : la puissance active et la puissance réactive injectent par l'onduleur sont modélises par :

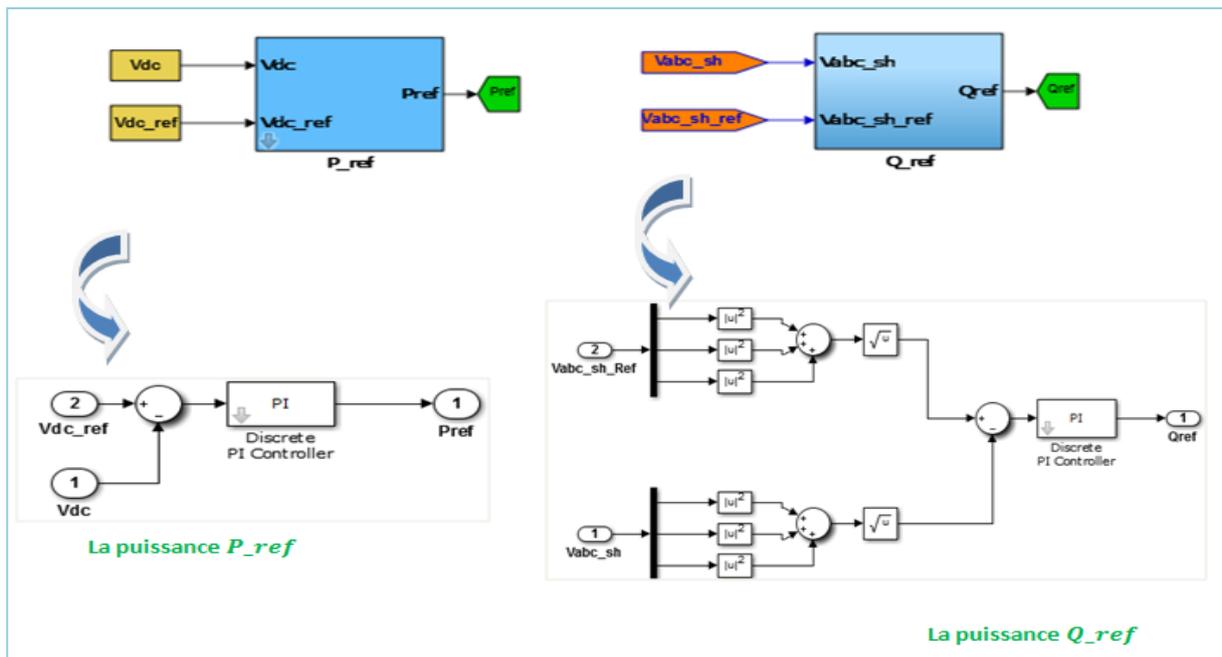


Figure 68 : la puissance  $P_{ref}$  / la puissance  $Q_{ref}$

### 3.3 Le contrôle par la méthode de watt var découplé :

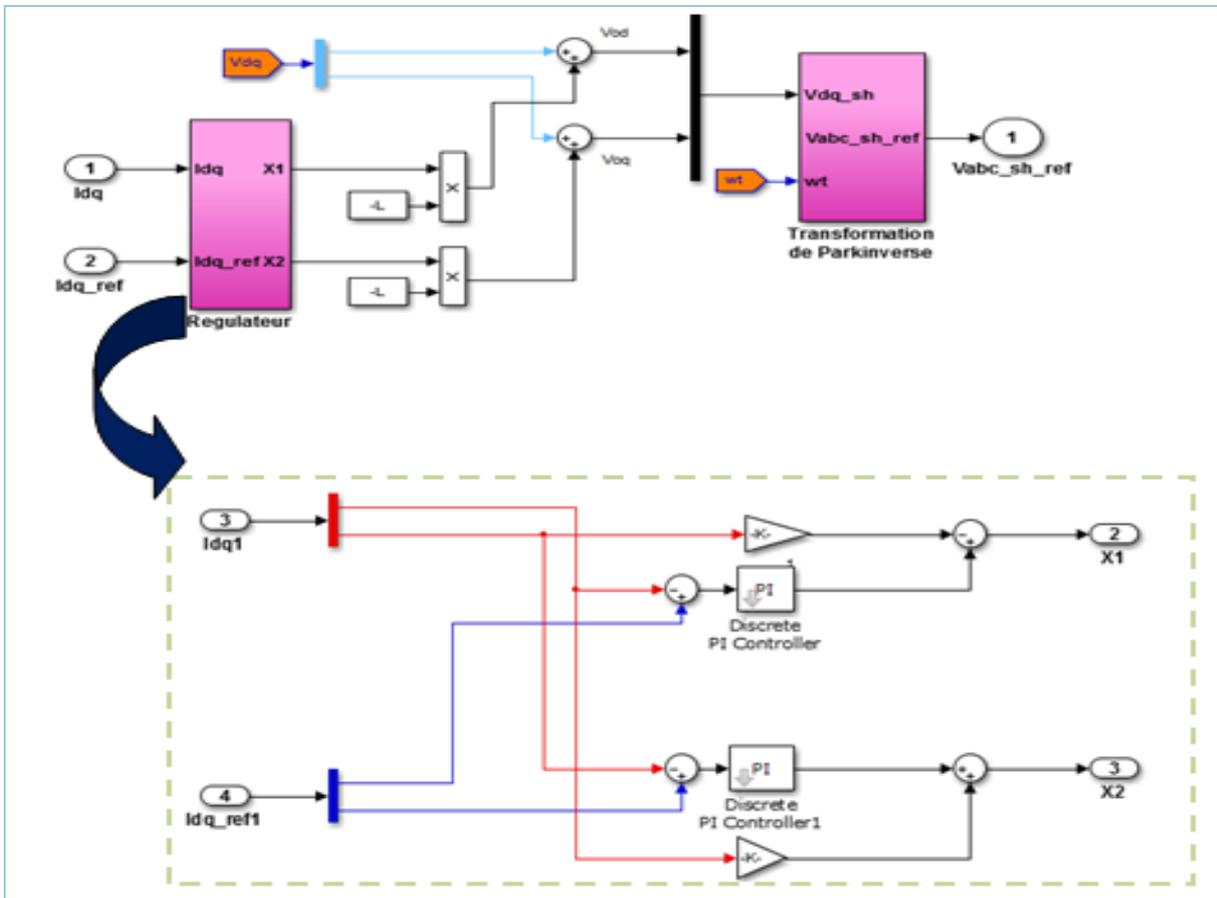


Figure 69: Contrôle par la méthode de watt var découplé

A la sortie de ce bloc, on fait la transformation inverse de *park* qui donne par la suite les tensions de références pour générer les impulsions de l'onduleur.

### 3.4 La génération des signaux de commande par (PWM):

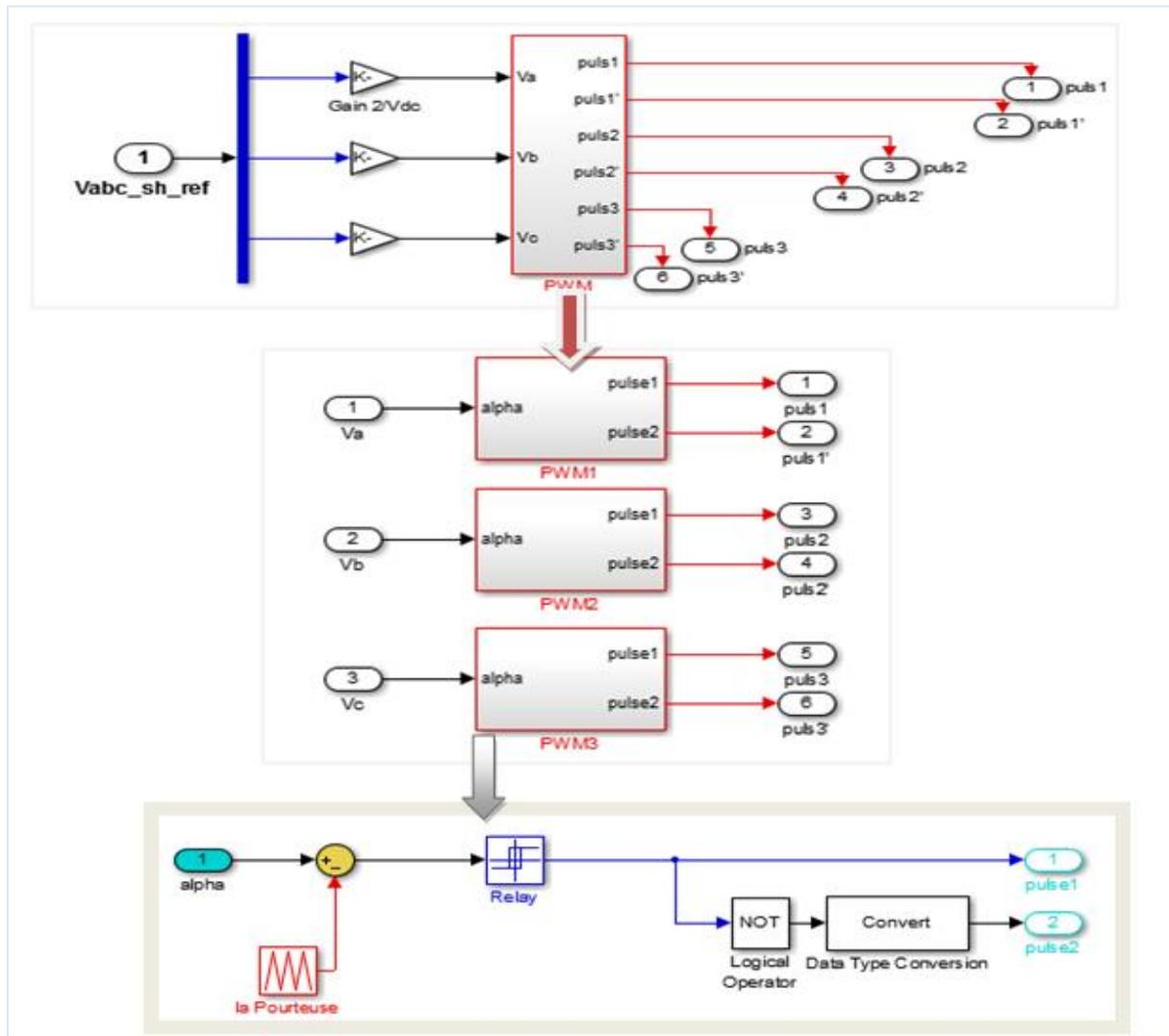


Figure 70 : La génération des impulsions pour le STATCOM



#### 4.1.2. La capacité du bus continu:

Le choix de la tension  $V_{dc}$  et de la capacité de condensateur  $C_{dc}$  affecte la dynamique et la qualité de compensation du STATCOM.

La valeur du condensateur du bus continu peut s'écrire comme suit :

$$C_{dc} = \frac{1}{2\omega} \frac{S_n}{\Delta V_{dc} V_{dc}}$$

Où :

$S_n$  : représente la puissance nominale de la charge. ( $S_n = \frac{50 \cdot 3 \cdot 10^6}{0.89} = 168.5 MVA$ )

$\Delta V_{dc}$  : Correspond aux oscillations de la tension du bus continu :

$$\Delta V_{dc} = 5\% V_{dc\_ref}$$

Avec l'expression de  $V_{dc\_ref}$  s'écrit :

$$V_{dc\_ref} = 2\sqrt{2} \times V_s$$

Et l'expression de  $V_{dc}$  s'écrit:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}V_{eff}}{\pi}$$

#### Application numérique :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6} * 20 * 10^3}{\pi}$$

$$V_{dc} = 46.78 Kv$$

La capacité  $C_{dc}$  :

$$\begin{aligned} C_{dc} &= \frac{S_n}{2 * \pi * f * 0.05 * V_{dc\_ref} * V_{dc}} \\ &= \frac{S_n}{2 * \pi * f * 0.05 * 2\sqrt{2} \times V_s * \frac{3\sqrt{6}V_{eff}}{\pi}} \\ &= \frac{S_n}{103.9 * V_s * V_{eff}} \end{aligned}$$

$$C_{dc} = 2.02 mF$$

### 4.1.3. Le transformateur de couplage :

Le transformateur de couplage est un transformateur étoile – triangle utilisé pour connecter le Statcom au réseau électrique. Il est caractérisé par :

Fréquence (Hz) :  $f = 50$  Hz

Type de fonctionnement : élévateur.

Tension primaire : 2KV

Tension secondaire : 20KV

### 4.2 Les résultats de la simulation :

Les résultats de la simulation (Parc+STATCOM) sont illustrés sur la figure suivante :

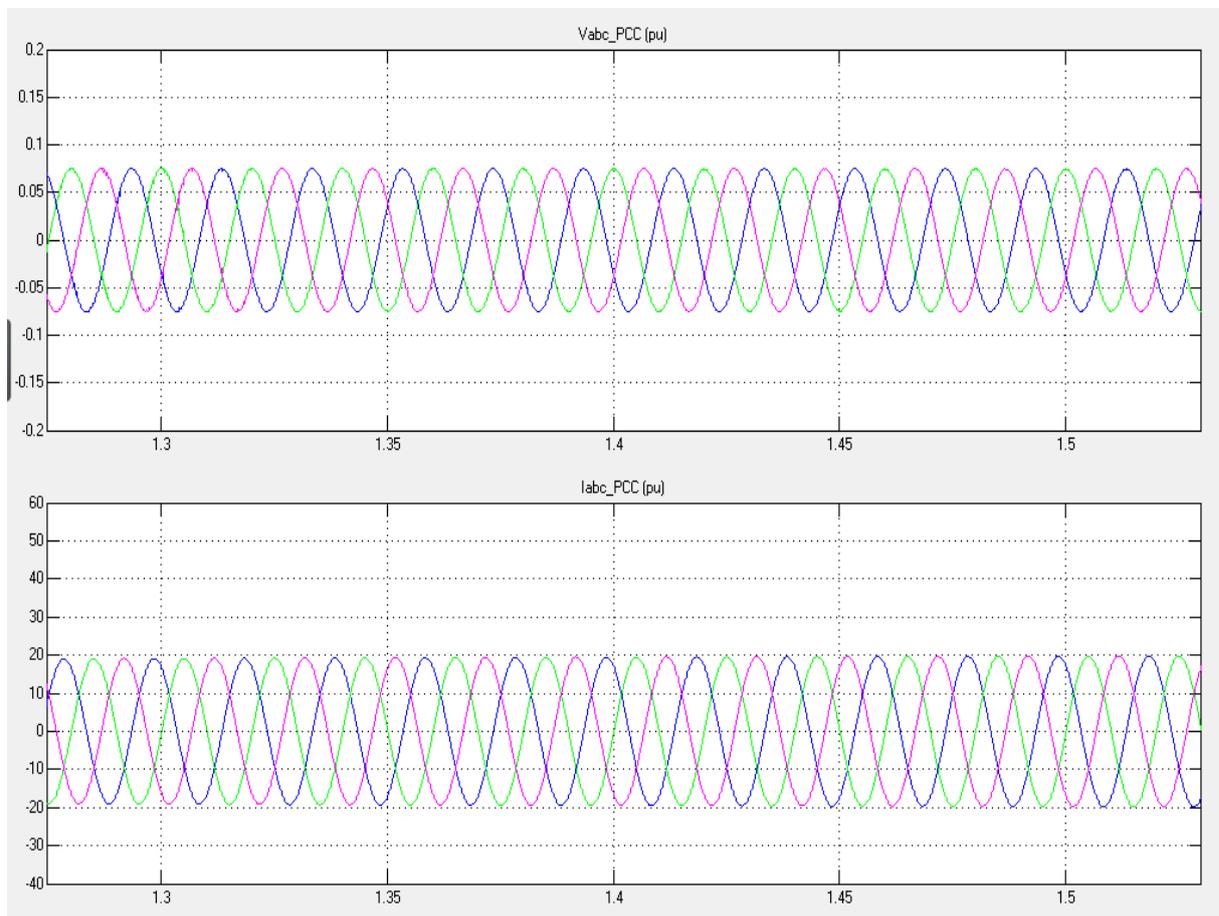


Figure 72 : Les résultats de la simulation (Parc+STATCOM)

D'après le Flickermètre, on a trouvée les résultats suivants :

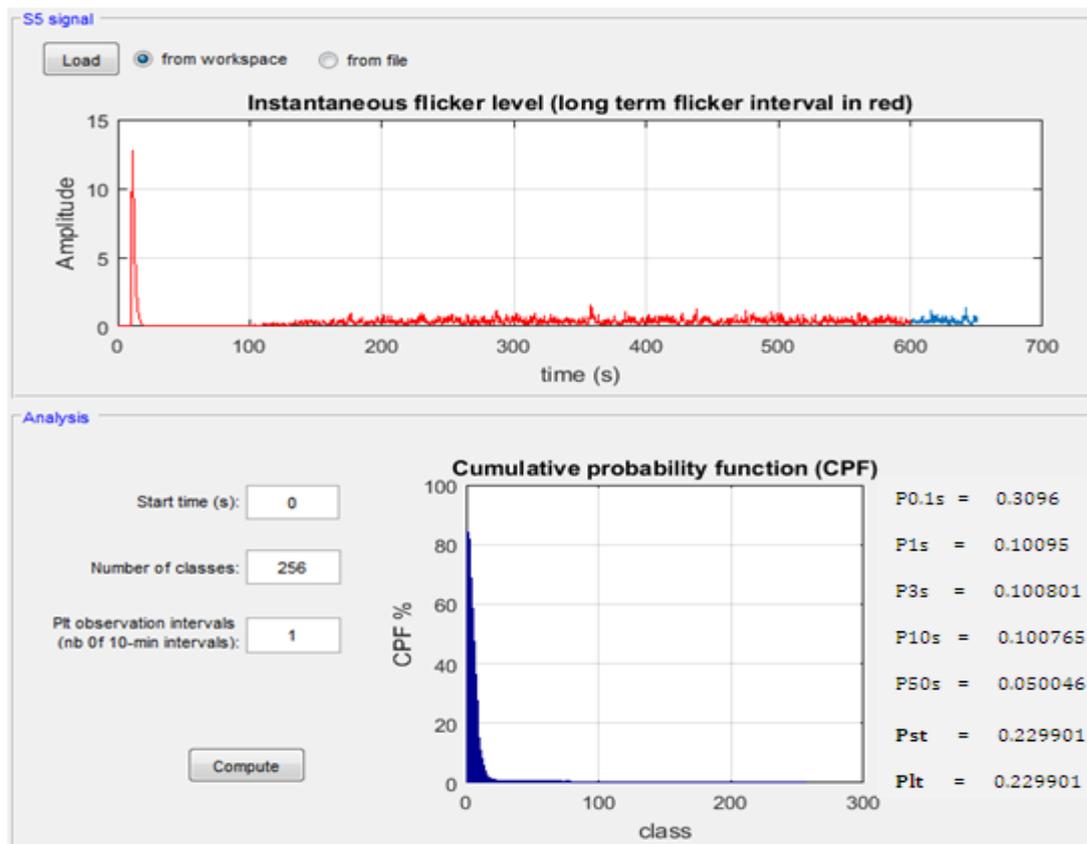


Figure 73 : les valeurs de sévérités d'une phase au point de raccordement la présence de STATCOM

### Interprétations :

On remarque que les indicateurs de sévérités Pst et Plt sont dans les limites acceptables d'émission de Flicker. (Pst=0.22<0.35 et Plt=0.22<0.25)

Les performances obtenues sont très satisfaisantes du point d'atténuation des fluctuations de tension. La tension obtenue au point de raccordement PCC ne subit aucune distorsion car la STATCOM avec son pouvoir de compensation élevé peut atténuer des perturbations autres que le Flicker.

## **Conclusion générale :**

L'étude de la stabilité des réseaux électrique constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux, comme nous avons pu le constater tout le long de ce rapport.

Ce rapport avait pour objectif d'étudier l'impact de l'énergie éolienne sur le réseau électrique, plus précisément les perturbations harmoniques et les fluctuations rapides de tension 'le flicker'.

Afin d'éliminer les harmoniques, une des solutions les plus efficaces pour les corriger est l'utilisation des filtres actifs parallèles ayant pour but, de dépolluer le réseau et de compenser l'énergie réactive, dont nous avons bien détaillé les stratégies de commande du filtre actif parallèle, pour le filtrage des harmoniques dans le réseau électrique.

La méthode d'identification des puissances instantanées choisie pour identifier le plus grand nombre de perturbations en courant, tels que les courants harmoniques a offrir l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. La validation de la méthode des puissances instantanées a été effectuée par simulation à partir du logiciel *Matlab – Simulink*.

Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.

Dans la deuxième partie de ce rapport, nous sommes attachés à montrer l'intérêt que peut susciter un système flexible de transport à courant alternatif (FACTS) tels qu'un STATCOM, et l'impact positif qu'il peut avoir sur la stabilité d'un réseau électrique perturbé.

Dans la partie modélisation, nous avons présenté le modèle mathématique du STATCOM connecté à un réseau électrique, afin d'analyser l'influence de ce compensateur sur le réseau. Nous avons utilisé la commande MLI, car les puissances mises en jeu sont importantes, ce qui nécessite un contrôle de la fréquence des commutations.

Nous avons étudié la Méthode dite «Watt-Var Découplé» pour l'identification des références dont nous avons conclu qu'elle donnait des meilleurs résultats, ce qui a été prouvé via la simulation sous l'environnement *Matlab/Simulink* et les résultats de simulation ont été satisfaisants.

Cette étude a été faite afin de montrer que le STATCOM est une nécessité actuelle et cruciale pour tout réseau électrique, afin de prévoir et éliminer les perturbations intempestives pouvant surgir au cours de l'exploitation et le transport de l'énergie électrique et de confirmer que c'est le moyen le plus adéquat au maintien de la tension d'un réseau électrique soumis à des perturbations.

Il reste encore beaucoup de voie à explorer il nous semble prioritaire de poursuivre une étude plus approfondie sur :

- L'interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques.
- Etude de la stabilité des réseaux multi machines.
- Application d'autres stratégies de commande qui permettent d'avoir une bonne compensation (la stratégie MLI vectorielle optimisée), pour but d'améliorer nos résultats.
- Utilisation des systèmes FACT en filtrage des harmoniques de tension et de courant en même temps.
- Application des techniques intelligentes comme les réseaux de neurones et la logique floue pour le filtrage des harmoniques.

## Références

- [1] ADEME (Agence de l'environnement et de maîtrise de l'énergie) : Énergie éolienne.
- [2] F. Kendouli, « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation », Revue des Energies Renouvelables, 2011.
- [3] HADDAD SALIM, « Gestion De La Qualité D'énergie Electrique Dans Un Réseau De Transmission », Faculté des Sciences de l'ingénieur, 2010
- [4] Salem Hafsia, « Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées » Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie, le 03/03/2015 .
- [5] CHENNAI Salim , « Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle » Thèse de Doctorat à Université Mohamed Khider – Biskra Faculté des Sciences et de la technologie, le : 19/09 /2013.
- [6] Abdelmadjid CHAOUI « Filtrage Actif Triphasé Pour Charges Non Linéaires » École Supérieure D'ingénieurs De Poitiers, le 7 août 2006.
- [7] NEKKAR Djamel, « Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés » Mémoire de Magister à Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, Faculté des Sciences et de la Technologie, 2013-2014
- [8] OMEIRI AMAR, « Simulation D'un Filtre Actif Parallèle De Puissance Pour La Compensation Des Harmoniques » THESE De DOCTORAT, Université Badji Mokhtar Annaba ,2007 .
- [9] Salma El Aimani, « Modélisation Des Différentes Technologies D'éoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension » Thèse de Doctorat Université Des Sciences Et Technologies De Lille, le 06/12/2014.
- [10] KOUADRA FOUED, « Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT » Mémoire De Magister à l'Université Mentouri De Constantine, Faculté des Sciences de l'Ingénieur.
- [11] flicker ou scintillement des sources lumineuses
- [12] OMAIMA EL ALANI, « Impact de l'intégration du parc éolien de Taza sur le réseau: Flicker », Faculte des Sciences et Techniques Fès, 2015.
- [13] M. HAMADOU Zakaria, « Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique », Mémoire de Magistère à l'Université De Setif, Faculté de Technologie, le 20 Juin 2012.
- [14] ABDELAALI ALIBI, « Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems) », à l'université de Batna, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, le 13 /06/2009.
- [15] MOKHNACHE Madiha, « Etude de la stabilité d'une ferme éolienne connectée à un réseau électrique avec des dispositifs FACTS », Mémoire de Magister, Faculté de Technologie, le 08/01/2012.
- [16] BOUTABA SAMIA, « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC », Mémoire de Magister, à l'Université Hassiba Ben Bouali Chlef, Faculté des Sciences & Sciences de l'Ingénieur, le 09/06/2009.

## Annexe :

- Fiche du parc éolien de Taza**

Caractéristiques	ECO 100 serie2	ECO 110 serie2
Adaptée pour des vitesses moyennes annuelles de vent	10m/s	8.5ms
Vitesse minimum pour la production d'électricité	3m/s	
Adaptée pour des rafales de vent avec un retour d'occurrence aux 50ans	70m/s	59.5 m/s
Hauteur du mat	75m	
Diamètre des pales	100.8m	109.8m
Hauteur totale (mat plus pales)	125m	130m
Inclinaison verticale	8°	
Surface balayée par les pales	7980m <sup>2</sup>	9469m <sup>2</sup>
Game de vitesse du rotor	8 à 14.2 tours par minute	7.7 à 13.6 tours par minute
Type de fondation requise	Fondation en béton de forme octogonale avec un piédestal	
Poids d'une pale	10 tonnes	12 tonnes
Poids total de l'éolienne	150 tonnes	155 tonnes
Température d'exploitation	-10 à + 40°C	
Puissance du générateur	3 MW	
Durée de vie	20ans	
Diamètre de la base du mat	4.26m	
Diamètre de la tour du mat	2.85m	
Taille de la nacelle	4.7 (hauteur)*7.1 (largeur) m	
Matériaux pour le mat	Acier	
Surface d'une pale	119m <sup>2</sup>	129m <sup>2</sup>
Protection contre les éclaires	Niveau 1	

- Coefficients de Flicker**

Les valeurs de coefficient  $C(\psi_k, V_a)$  selon la norme CEI 61 400 – 21:

$\Psi_k$	30° [25 ; 40]	50° ] 40 ; 60]	70° ] 60; 77]	85° ] 77; 90]
$C(\psi_k, V_a) : V_a = 6m/s$	2.6	2.1	1.5	1.1
$C(\psi_k, V_a) : V_a = 7.5m/s$	2.9	2.4	1.7	1.2
$C(\psi_k, V_a) : V_a = 8.5m/s$	3.0	2.5	1.7	1.3
$C(\psi_k, V_a) : V_a = 10m/s$	3.2	2.6	1.7	1.4

Les valeurs de coefficient  $k_{f,i}(\Psi_k)$  selon la norme CEI 61 400 – 21 :

$\Psi_k$	30°	50°	70°	85°
Couplage à vent minimal	0.75	1.5	1.5	2.7
Couplage à vent nominal	1.95	2.25	2.4	2.4
Basculement	1.95	2.4	2.85	2.85

Le nombre de fluctuation de chaque turbine éolienne  $N_{10}$  (d'une période de 10 min) et  $N_{120}$  (d'une période de 120 min) :

	$N_{10}$	$N_{120}$
Couplage à vent minimal	10	120
Couplage à vent nominal	1	12
Basculement	10	120

• Application de la transformation pour un circuit comprenant :

- Une inductance dans le plan d-q:

$$U_d = L \frac{dI_d}{dt} - L \cdot \omega I_q$$

$$U_q = L \frac{dI_q}{dt} + L \cdot \omega I_d$$

- Une capacité dans le plan d-q:

$$i_d = C \frac{dU_d}{dt} - C \cdot \omega U_q$$

$$i_q = C \frac{dU_q}{dt} + C \cdot \omega U_d$$

- Une résistance dans le plan d-q:

$$U_d = Ri_d$$

$$U_q = Ri_q$$