الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique et de l'Informatique



Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master enGénie Électrique

Spécialité : *Réseaux Electriques*

THEME

L'IMPACT DE L'INTEGRATION DE LA CHAINE PHOTOVOLTAIQUE DANS RESEAU DISTRIBUTION

Proposé et dirigé par,

Dr. A.GACEMI

Préparé et présenté par,

M. TOUZOUT MOHAMED

M. KHELIFA MUSTAPHA

FR. Résumé

L'électricité produite par l'énergie solaire est une ressource non négligeable mais cette dernière reste très intermittente : en effet, la puissance produite par un panneau Photovoltaïque par exemple dépend fortement de l'éclairement et de la température, ce qui implique de gros changements de puissance dans le cas d'une chaine de production Photovoltaïque, afin d'optimiser ce genre de système et les intégrer dans des réseaux on utilise un étage d'adaptation composé d'un convertisseur DC/DC contrôlé par MPPT et un convertisseur DC/AC .

A travers ce mémoire nous simulerons une chaine de production avec chaque composant la constituant et nous intégrerons les résultats à un réseau de distribution pour voir leur impacte sur ce dernier

Mots clés : Photovoltaïque, MPPT, hacheur Buck-Boost, onduleur à deux niveaux, MLI, chaine de production Photovoltaïque

EN. Abstract

The electricity generated by solar energy is valuable resource but it's stay very intermittent in fact, the power produced by PV panel for example is strongly depends on illumination and temperature which implies larges in power in the case of line of PV production To optimize this kind of system and integrate them into networks, we use stage of adaptation which is composed by DC/DC converter controlled by an MPPT and DC/AC converter

Through this memory, we simulate production line with each component's constituent and we will incorporate the result in a grid to see their impact on it

Keywords: Photovoltaic, MPPT, Buck-Boost chopper, two-level inverter, PWM, production chain Photovoltaic

AR. الملخص

تعتبر الكهرباء المولدة من الطاقة الشمسية موردا طبيعيا لا يستهان به غير انها تبقى شديدة التقطع في الواقع . القوة التي تنتجها اللوحة الكهروضوئية على سبيل المثال تعتمد بشكل كبير على الاضاءة وشدة الحرارة وهذا ما يؤدي الى تغيرات في شدة القوة في حالة سلسلة الانتاجات الكهروضوئية ولتحسين هذا النوع من النظام و ادماجه في الشبكات نستعمل طابق مكيف متكون من محولات DC/DC مراقبة من MPPT .

من خلال هذا البحث سنحقق سلسلة انتاج من كل المكونات التي تشكلها وندمج النتائج في شبكة التوزيع لرؤية ما اثرها عليها.

Remerciement

Remerciements à dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience et qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promoteur Mr Abd El Rezak GACEMI d'avoir accepter de nous encadrer et pour le suivi continuel tout le long de la réalisation de ce mémoire et qui n'ont pas cessée de nous donner ses conseils et des remarques

Nos remerciements vont aussi au président du jury et aux membres du jury examinateurs qui nous fait l'honneur de participant au jugement de ce travail

Ainsi qu'a tous les enseignants du département d'électrotechnique MEDEA qui ont contribués à notre formation.

DEDICACE

JE DIDIE CE MODESTE TRAVAIL A :

A LA FLEUR DE MA VIE… MA TRES CHERE MERE BAHIA AVEC TOUTE MON AFFECTION.

A MON PERE ABD EL KADER QUI A SACRIFIE SA VIE POUR QU'IL PUISSE ME TROUVER A CE NIVEAU ET QUI M'A ETE LA SOURCE DE REUSSITE AVEC TOUTE MA RECONNAISSANCE

A MES SOEURS , MON FRERE
A MON NEVEU ADNAN ,MA NIECE NOUNOU et MALAK
A MA GRANDE MERE QUE DIEU LA GARDE.

A TOUS MES AMIS ET A TOUS MES COLLEGUES SANS OUBILIER LES ETUDIANTS DE LA FACULTE EN GENIE ELECTROTECHNIQUE SURTOUT LES ETUDIANTS DE LA 5EME ANNEE PROMO 2014
A TOUS QUE J'AIME ET QUI M'AIMENT.
A TOUS QUI CONNAISSENT TOUZOUT MOHAMED
A TOUS CEUX QUI M'ONT AIDE, DE PRES OU DE LOIN SANS OUBILIER LES PROCHES QUE J'AI MENTIONNES ET LES AUTRES QUE J'AI OUBLIES VEUILLEZ M'EXCUSER

JE VOUS REMERCIE TOUS

MOHAMED TOUZOUT

DEDICACE

JE DIDIE CE MODESTE TRAVAIL A :

A LA FLEUR DE MA VIE… MA TRES CHERE MERE **YAMINA** *AVEC TOUTE MON AFFECTION.*

A MON PERE **MOHAMED** *QUI A SACRIFIE SA VIE POUR QU'IL PUISSE ME TROUVER A CE NIVEAU ET QUI M'A ETE LA SOURCE DE REUSSITE AVEC TOUTE MA RECONNAISSANCE*

A MES SOEURS, MON FRERE ET ABD RAHMAN ET MARAME ET YAZID

A TOUT MA FAMILLE (KHELIFA ET AOUF) ONCLES, TANTES, COUSINS ET COUSINES

A TOUS MES AMIS ET A TOUS MES COLLEGUES SANS OUBILIER LES ETUDIANTS DE LA FACULTE EN GENIE ELECTROTECHNIQUE SURTOUT LES ETUDIANTS DE LA 2EME MASTER PROMO 2014

A TOUS QUE J'AIME ET QUI M'AIMENT.

A TOUS QUI CONNAISSENT KHELIFA MUSTAPHA

A TOUS CEUX QUI M'ONT AIDE, DE PRES OU DE LOIN SANS OUBILIER LES PROCHES QUE J'AI MENTIONNES ET LES AUTRES QUE J'AI OUBLIES VEUILLEZ M'EXCUSER

JE VOUS REMERCIE TOUS

KHELIFA MUSTAPHA

Table des Figures

Les figures	N° page
Figure I.1	6
Figure I.2	7
Figure I.3	8
Figure I.4	9
Figure I.5	11
Figure I.6	12
Figure I.7	13
Figure I.8	13
Figure II.1	24
Figure II.2	24
Figure II.3	26
Figure II.4	26
Figure II.5	30
Figure II.6	32
Figure II.7	35
Figure II.8	41
Figure III.1	44
Figure III.2	45
Figure III.3	46
Figure III.4	47
Figure III.5	48
Figure III.6	49
Figure III.7	51
Figure III.8	56
Figure III.9	56

Table des Figures

Figure IV.1	**59**
Figure IV.2	**61**
Figure IV.3	**62**
Figure IV.4	**63**
Figure IV.5	**64**
Figure IV.6	**65**
Figure IV.7	**66**
Figure IV.8	**67**
Figure IV.9	**69**
Figure IV.10	**71**
Figure IV.11	**72**
Figure IV.12	**72**
Figure IV.13	**74**
Figure IV.14	**75**
Figure IV.15	**75**
Figure V.1	**79**
Figure V.2	**80**
Figure V.3	**80**
Figure V.4	**81**
Figure V.5	**83**
Figure V.6	**84**
Figure V.7	**84**
Figure V.8	**85**

Liste des Tableau

Les Tableau	N° page
Tableau I.1	14
Tableau V.1	83
Tableau V.2	85

Symbole & notation

symbole	Notation	Unité
PV	Panneau photovoltaïque	/
TBT	Très base tension	Volte (V)
BTA	base tension Catégorie A	Volte (V)
BTB	base tension Catégorie B	Volte (V)
HTA	Très haut tension Catégorie A	Kilovolt(KV)
HTB	Très haut tension Catégorie B	Kilovolt(KV)
BT	base tension	Volte (V)
MT	Moyenne tension	Volte (V)
GED	Génération d'énergie dispersée	/
ET	Elément de transport	/
P	puissance active	(W)
Q	puissance réactive	(VAR)
R	Résistance	(Ω)
X	Réactance	(Ω)
V	Tension	Volte (V)
Pj	Les pertes joule et	(W)
Pjr	Les pertes joule triphasées	(W)
V_g et V_{gref}	les tensions mesurées et de consigne de l'alternateur	Volte (V)
Q_g et Q_{gref}	les puissances réactives mesurées et de consigne de l'alternateur	(VAR)
Q_{lim}	la limitation de puissance réactive que peut fournir ou absorber l'alternateur	(VAR)
Q_j^{MAX} et Q_j	la réserve de puissance réactive et la puissance réactive	(VAR)
N	est le niveau de participation (compris entre -1 et +1)	/
V_p et V_{pref}	les tensions mesurées et de consigne du nœud pilote	Volte (V)
RST	Le réglage secondaire de tension	/

Symbole & notation

RSCT	Le réglage secondaire coordonne de tension	/
R_s ,R_{sh}	une résistance série et une résistance shunt	(Ω)
V_{OC}	tension de circuit ouvert	Volte (V)
P&O	Perturb and Observe	/
PPM	point de puissance maximale	/
MPPT	Maximum Power Point Tracking	/
I_{ph}	le photo-courant	Ampère(A)
I_0	le courant de saturation	Ampère(A)
(A)	le facteur d'idéalité de la jonction	/

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : LE RESEAU ELECTRIQUE

I.1 INTRODUCTION. ……..…….……...…04

I.2 FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES ELECTRIQUES……..…...…...04

I.2.1 Aperçu général ……..04

I.2.2 Organisation physique : la séparation des fonctions…….……05

I.2.2.1 *Production*…….…..……07

I.2.2.2 *Transport*……..…….…….....….08

I.2.2.4 *Distribution*…….……..…..09

I.2.2.3 *Caractéristiques techniques générales*…….....…….10

I.2.2.5 *Consommation*……...…….....….14

I.2.2.6 *Supervision*……..…….……..…15

I.3 LA PRODUCTION DECENTRALISEE

I.3.1 définition de la production décentralisée……...…..15

I.3.2 différents types de la production décentralisée.…….....16

I.3.2.1 *Les énergies renouvelables*…….…..…….…...16

I.3.2.2 *Les énergies non renouvelables*…….....…….….17

I.3.2.3 *La cogénération*…….…..…….……..18

I.3.2.4 *avantage et potentiel de la production décentralisée*…….……18

I.4 IMPACTS DE LA PRODUCTION DECENTRALISE SUR LES RESEAUX DE DISTRIBUTION……19

I.5- CONCLUSION…….……20

CHAPITRE II : INTRODUCTION AU PROBLEME REGLAGE DE LA TENSION

II.1 INTRODUCTION. ……...…….……...22

II.2 RAPPEL SUR L'IMPORTANCE DE LA TENUE DE TENSION ET DE FREQUENCE DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES……..…22

II.2.1 Pour la sécurité des réseaux……22

II.2.1.1 *La tenue de tension*……...…22

II.2.1.2.*La tenue de fréquence*……..…23

II.2.2 Pour l'exploitation normale des réseaux……..…23

II.2.2.1 *Chutes de tension et pertes Joule*……25

II.2.2.2 *Puissance transmissible*……..……26

II.2.3 Les services système……..……28

SOMMAIRE

II.3. REGLAGE HIERARCHISE TENSION / PUISSANCE REACTIVE (U/Q) DANS LES RESEAUX DE TRANSPORT…….……...29

II.3.1 Tension et puissance réactive : des grandeurs locales…….…..29

II.3.2 Le réglage hiérarchisé de tension…….……31

II.3.2.1 *Le réglage primaire*……..……*33*

II.3.2.2 *Le réglage secondaire*……..*33*

II.3.2.3 *Le réglage tertiaire*…….…...*34*

II.4.LE REGLAGE SECONDAIRE COORDONNE…….….34

II.4.1 *Une évolution du RST*…….……*34*

II.4.2 *L'idée du RSCT*……*36*

II.4.3 *La fonction objectif pour le RSCT*…….....*38*

II.4.4 *Les contraintes*……..*39*

II.5 REGLAGE DE LA TENSION DANS LES RESEAUX DE DISTRIBUTION ACTUELS…….….40

II.5.1.Compensation de puissance réactive au poste source……40

II.5.2. Régleurs en charge…….....40

II.6. CONCLUSION…….41

CHAPITRE III : LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES

III.1 INTRODUCTION ……..……43

III.2 GENERALITES SUR LES PANNEAUX PV ……..…..44

III.2.1 Les cellules PV ……..….44

III.2.2-Schémas équivalent d'une cellule PV……..…44

III.2.3-Caractéristique courant tension……. 45

III.2.4-Générateur PV…….…….47

III.3-ETAGE D'ADAPTATION……..…...49

III.3.1-Convertisseur DC-DC (Hacheur)…….…..50

III.3.2-Convertisseur DC-AC (Onduleur)……...…...52

III.4-GENERALITES SUR LE RESEAU ELECTRIQUE……...……..54

III.4.1-Réseaux de transport……55

III.4.2-Réseaux de distribution……55

III.5-TYPE D'INSTALLATION ……..…… 55

III.6-CONCLUSION……57

SOMMAIRE

CHAPITRE IV : Modélisation et simulation PHOTOVOLTAÏQUES

IV.1 INTRODUCTION ……..…59

IV.2 MODELISATION DU PANNEAU PV ……....59

IV.2.1 Modélisation ……...60

IV.2.2 Résultats de la simulation ……..……62

IV.3 MODELISATION DU HACHEUR BUCK-BOOST (DC/DC)…….63

IV.3.1 Modélisation du hacheur…….63

IV.3.2 Dimensionnement des composants……68

IV.3.3 Commande du hacheur……...69

IV.3.4 Résultats de la simulation……...70

IV.4 MODELISATION DE L'ONDULEUR A DEUX NIVEAUX ……..….71

IV.4.1 Structure de l'onduleur a deux niveaux……...……71

IV.4.2 Commande de l'onduleur……...73

IV.4.3 Résultat de simulation…….74

IV.5 CONCLUSION ……..76

CHAPITRE V : INTEGRATION DU PHOTOVOLTAÏQUES AU RESEAU

V.1 INTRODUCTION ……...…78

V.2 CONFIGURATION DE LA CHAINE PV……...78

V.2.1 Simulation et résultats …….79

V.3 INTEGRATION DE LA CHAINE PV A UN RESEAU DE DISTRIBUTION

V.3.1 Intégration dans un réseau 16 nœud……..82

V.3.2 Intégration dans un réseau 34 nœud……..84

V.4 CONCLUSION……86

CONCLUSION GENERAL……..……89

I.1 Introduction

L'électricité représente dans le monde près de 20% de la consommation finale d'énergie [1].Le système électrique est ainsi au centre du développement de nos sociétés modernes et son bon fonctionnement est donc primordial pour la continuité des activités économiques.

Or, les réseaux électriques des pays d'Organisation de Coopération et de Développement Économiques sont aujourd'hui en pleine mutation. Ces réseaux ont la particularité d'être des réseaux de grandes dimensions, interconnectés et conçus pour fonctionner avec de la génération centralisée de forte puissance. L'ouverture du marché de l'énergie électrique et les préoccupations environnementales grandissantes, liées au changement climatique planétaire amènent des changements importants sur ces réseaux électriques, en particulier sur les réseaux de distribution avec l'arrivée massive de productions décentralisées. Cette phase transitoire est plus ou moins accomplie suivant les pays mais globalement, les mêmes transformations et mécanismes se retrouvent d'un pays à un autre.

Ce chapitre s'articule autour de trois parties. Après un bref rappel du fonctionnement technique et économique général des systèmes électriques, une description plus détaillée des réseaux électrique est donnée en deuxième partie, en fin présentées les différents types de productions décentralisées.

I.2 Fonctionnement des systèmes électriques [2]

I.2.1 Aperçu général sur les étapes de développement du réseau de l'Algérie

Au début XX^{éme} siècle, 16 sociétés se partageaient les concessions électriques en Algérie, le groupe Lebon (Compagnie Centrale d'éclairage par le Gaz) et la Société algérienne d'éclairage et de force (SAEF) au centre et à l'ouest, la Compagnie Du Bourbonnais à l'est ainsi que les usines Lévy à Constantine, Par décret du 16 août 1947, ces 16 compagnies concessionnaires sont transférées à EGA. Elles détenaient alors 90% des propriétés industrielles électriques et gazières du pays.

Dès son indépendance, en 1962, l'Algérie avait déjà opté pour le développement du secteur de l'électricité.

Société nationale de l'électricité et du gaz (SONELGAZ) a été crée en 1969, en remplacement de l'entité précédente Électricité et gaz d'Algérie (EGA), et on lui a donné un monopole de la distribution et de la vente de gaz naturel dans le pays, de même pour la production, la distribution, l'importation, et l'exportation d'électricité

La charte nationale en 1976, annonça la volonté de généralisation de l'électrification des ménagers à travers tout le territoire national, Cette généralisation aura une implication majeure sur le développement des réseaux de distribution et de transport, Jusque-là, l'entreprise Sonelgaz détenait le monopole sur la production, le transport, la distribution de l'électricité ainsi que le transport et la distribution du gaz.

En effet, cette entreprise publique au terme du monopole conféré par l'Etat, assumait seule la mission de service public dans le domaine de la distribution de l'électricité et du gaz, Mais, la nouvelle loi n° 02-01 du 05 février 2002 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisation a donné le coup d'envoi de la réorganisation du secteur, dominé par l'entreprise publique Sonelgaz.

La réorganisation de Sonelgaz s'est achevée avec la création de la société holding « Sonelgaz » ainsi que l'ensemble de ses filiales. Sonelgaz est aujourd'hui érigé en Groupe industriel composé de 35 filiales et 5 sociétés en participation. Les filiales métiers de base assurent la production, le transport et la distribution de l'électricité ainsi que le transport et la distribution du gaz par canalisations [3].

I.2.2 Organisation physique : la séparation des fonctions

Le développement à grande échelle des réseaux électriques s'est fait pendant les glorieuses trentaines, pour des raisons techniques et économiques, sous la forme d'un monopole verticalement intègre. L'énergie électrique étant alors et jusque dans les années 1990 produite de manière presque exclusivement centralisée, et consommée de manière totalement décentralisée. Cela a nécessite la mise en place d'un réseau capable de transporter l'énergie produite en quelques dizaines de points de productions vers plusieurs millions de consommateurs repartis sur l'ensemble du territoire.

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de

transport maillé à très haute tension (225 kV et 400 kV) pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition (63 kV et 90 kV), puis de distribution (20 kV) d'ou elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension (230/400 V).

Cette structure verticale "transport -(répartition)- distribution" est schématisée sur la (figure I.1). Notons ici que la terminologie "réseau de répartition" tend à disparaître, ce niveau de tension étant généralement englobé dans le terme "transport"

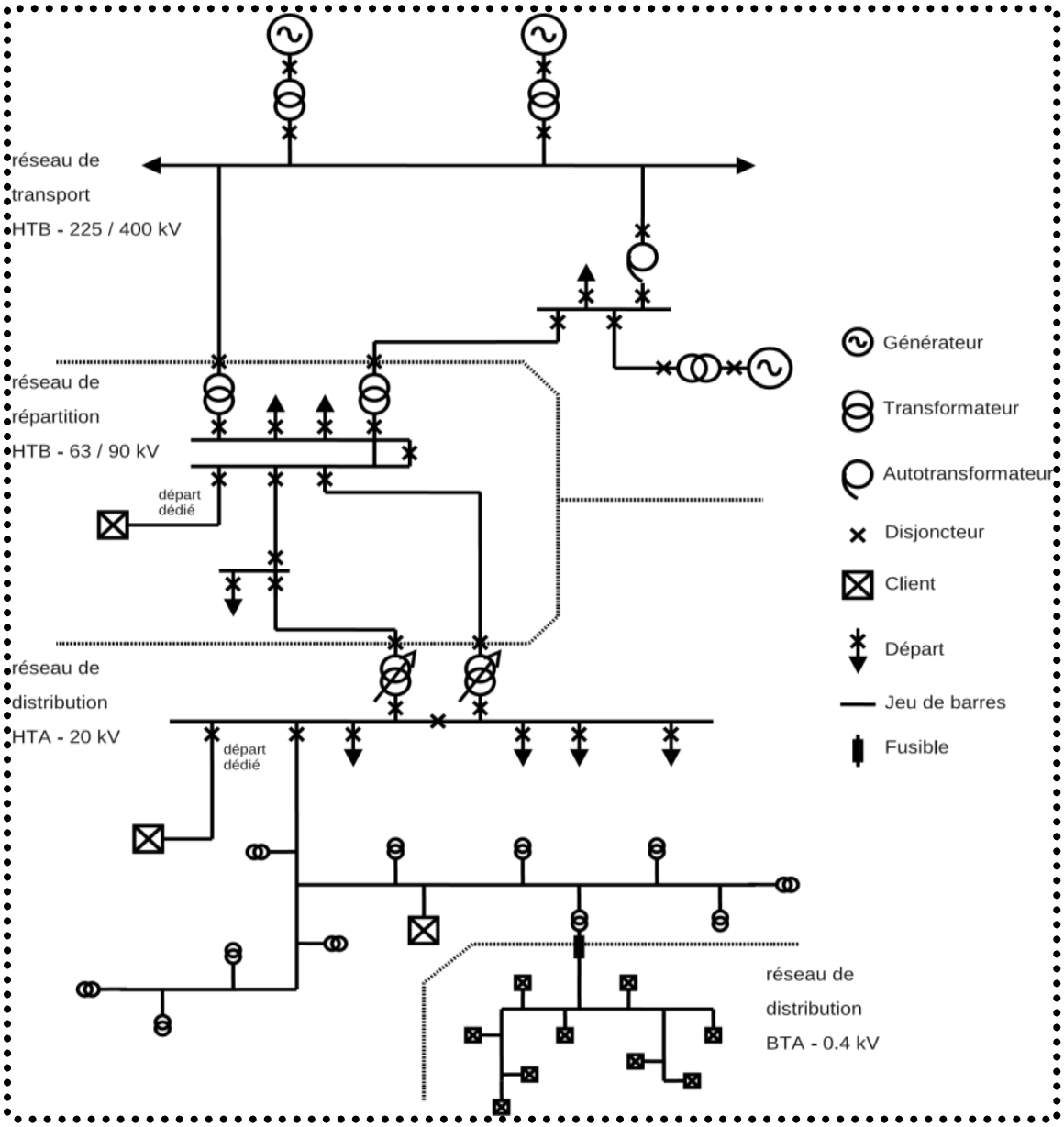


Figure I.1 _ *Organisation des différents niveaux de tension du système électrique(2)*

I.2.2.1 Production

Les grands groupes de production d'énergie électrique sont en général basés sur des alternateurs synchrones de grandes tailles entraînés par des turbines à vapeur, à gaz ou hydrauliques. Ils sont connectés sur le réseau de transport via un transformateur de groupe.

L'ordre de grandeur de la puissance active produite par ces groupes est compris entre 100MW pour les centrales thermiques de faibles puissances et 1 650MW pour les plus puissantes des centrales nucléaires en construction, La production peut être classée suivant le type d'énergie primaire utilisée pour générer de l'électricité.

La répartition des modes de production dans le monde en année 2010 est illustrée par la figure I.2.

Dans le monde, en moyenne, 27.3% de la production d'électricité est réalisée à partir de charbon. Cette moyenne cache cependant des situations très variées suivant les pays.

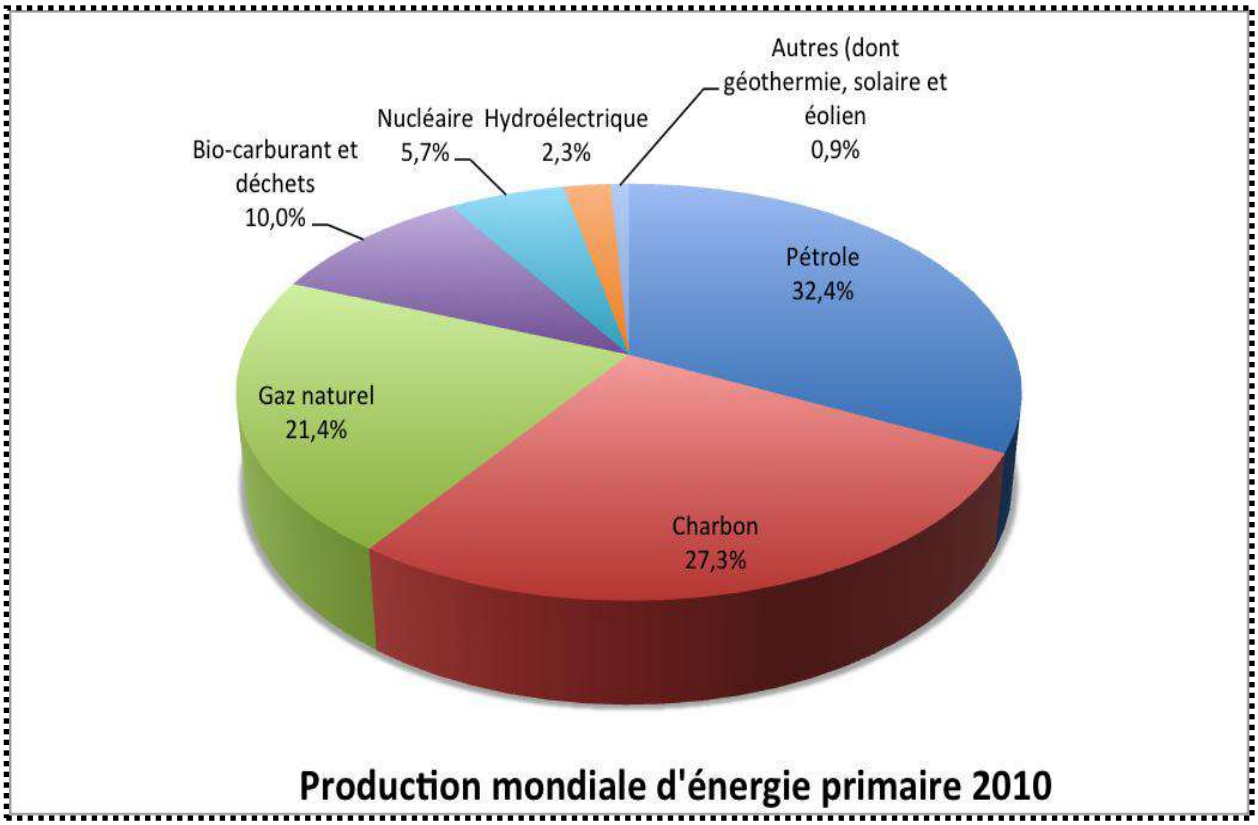


Figure I.2 _ *Production d'électricité par source dans le monde en 2010 (3)*

Ainsi que en L'Algérie Les impératifs de préservation de l'environnement imposent l'utilisation du gaz naturel comme énergie primaire pour la production d'électricité, par rapport aux autres énergies fossiles jugées polluantes, sachant que la ressource du gaz est largement disponible dan ce pays ,Mais la préoccupation environnementale exige aussi de développer d'autres énergies dites propres et renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne, dont les gisements sont disponibles et abondants notamment dans le Sud (Solaire) et Sud-ouest du pays (Eolien). Les raisons de ces choix technologiques sont multiples : géostratégiques, économiques, politiques, etc.

La production national en 2011 a éteint 48 871,2 GWh , elle est répartit par type d'équipement comme suit :

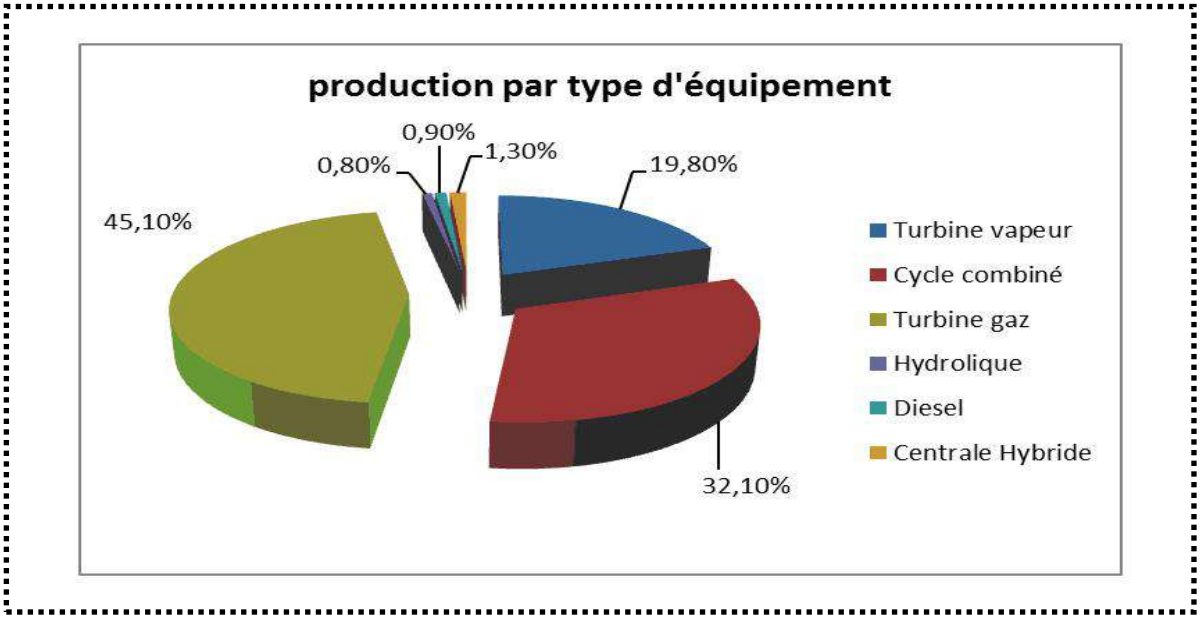


Figure I. 3 _ *Production par type d'équipement (3)*

I.2.2.2 Transport

Les réseaux de transport assurent le transport de l'énergie électrique sur de grandes distances. Afin de minimiser, entre autre, les pertes joules sur les lignes ces réseaux sont à très haute tension (de 60 kV à 400 kV). Du point de vue topographique, pour des raisons de sécurité de fonctionnement, les réseaux de transport sont des réseaux maillés interconnectés. Les flux de puissance peuvent ainsi être répartis entre toutes les lignes du réseau , leur gestion est par contre complexe :

Les transferts de puissance entre zones de production et zones de consommation sont très importants et variables. Ils rendent l'optimisation technico-économique des réseaux difficiles. Par conséquent, de manière générale, les réseaux de transport,

comparativement aux réseaux de distribution, sont très supervisés afin de pouvoir effectuer des contrôles de la tension, de la fréquence, la répartition des flux de puissance et des coûts de production, etc.

La longueur globale du réseau de transport de l'électricité à réaliser sur la période **2013-2023** est de l'ordre de **27 045 km** :

- **21 240 km**, déjà décidés dont **1 765 km** pour de réhabilitation,
- **5 805 km** pour les lignes en idée de projet.

La longueur du réseau du GRTE atteindra **49 178 km** en **2023**.

Le nombre de postes électriques de transformation à réaliser sur la période **2013-2023** est de **479 postes** dont :

- **373 postes déjà décidés (4 en réhabilitation),**
- **106 postes en** idée de projet.

Le nombre total de postes sera de **750** à l'horizon **2023** avec une puissance installée de **124 800 MVA [3]**.

Les appellations Algérie normalisées des différents niveaux de tension sont présentées dans la figure I.4.

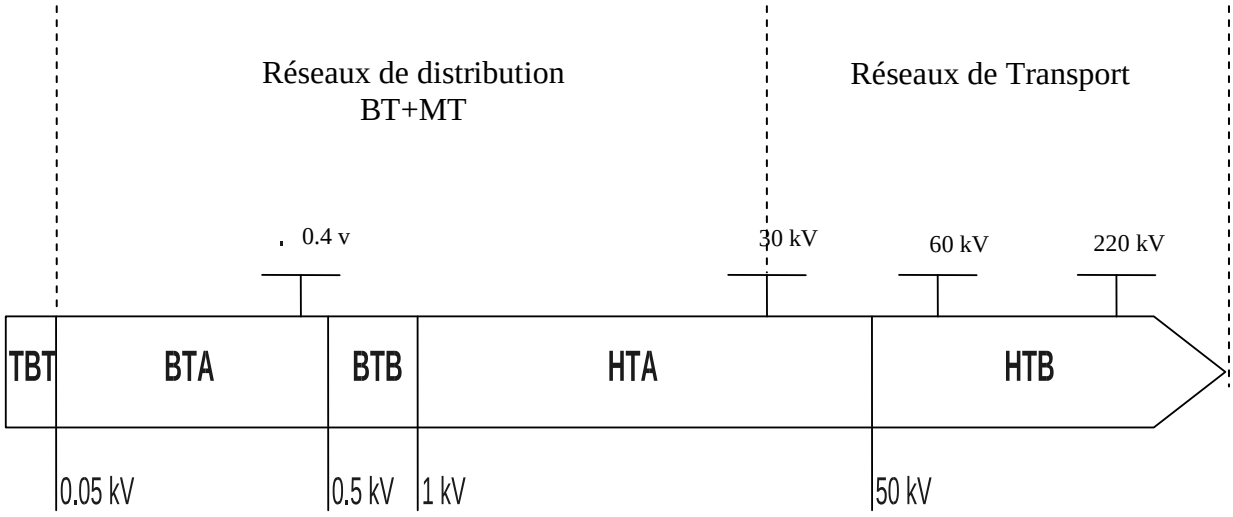


Figure I.4 _ *Appellations normalisées des différents niveaux de tension.(4)*

I.2.2.3 Distribution

Les réseaux de distribution assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local, leur tension est inférieure ou égale à 60 kV (HTA). Ils sont constitués de deux

types de réseaux : le réseau moyenne tension (MT), connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT).

En Algérie, le niveau de tension du réseau MT est de 30 kV, celui du réseau BT de 400V, le réseau BT constitue le dernier maillon du système électrique. Ses tronçons sont raccordés au réseau MT dans des postes de transformation HTA/BT. Ces niveaux de tension offrent un compromis technico-économique qui permet à la fois, de diminuer les chutes de tension, de minimiser le nombre de postes source (poste de connexion HTB/HTA) mais également de limiter les contraintes techniques et économiques inhérentes aux hautes tensions. Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du système électrique avec plus d'un million de kilomètres de lignes en Algérie **175 468 km** pour le réseau MT+BT et **82 920 postes [3]**.

I.2.2.4 Caractéristiques techniques générales

Pour des raisons de coût et de simplicité technique, les réseaux de distribution ont une structure arborescente [4], ce qui simplifie notamment considérablement le système de protections puisque le transit de puissance se fait de manière unilatérale du poste source HTB/HTA vers les postes HTA/BT et les consommateurs finaux. Ceci permet notamment la localisation et l'élimination rapide des défauts, ainsi que le comptage de l'énergie aux postes sources. Cette structure est donc parfaitement adaptée à un système verticalement intégré dans lequel la production est centralisée et la consommation distribuée.

a. les postes sources HTA / HTB

Les postes sources, en général alimentés par le réseau de répartition à 63 ou 90 kV (quelquefois directement par le réseau de transport a 225 kV) constituent l'interface entre les réseaux de transport/répartition et les réseaux de distribution. Ils sont constitués en phase initiale d'un transformateur alimenté par une arrivée HTB (HT1) et alimentant lui-même une ou deux rames, ou jeux de barres (figure I.5.a). En seconde phase, avec l'augmentation des charges a desservir, un second transformateur est ajouté (figure I.5.b), et le poste est généralement raccorde à une deuxième arrivée HTB (HT2) appelée "garantie ligne". En phase finale, un troisième (et quelquefois plus) transformateur est ajouté en double attaché (figure I.5.c).

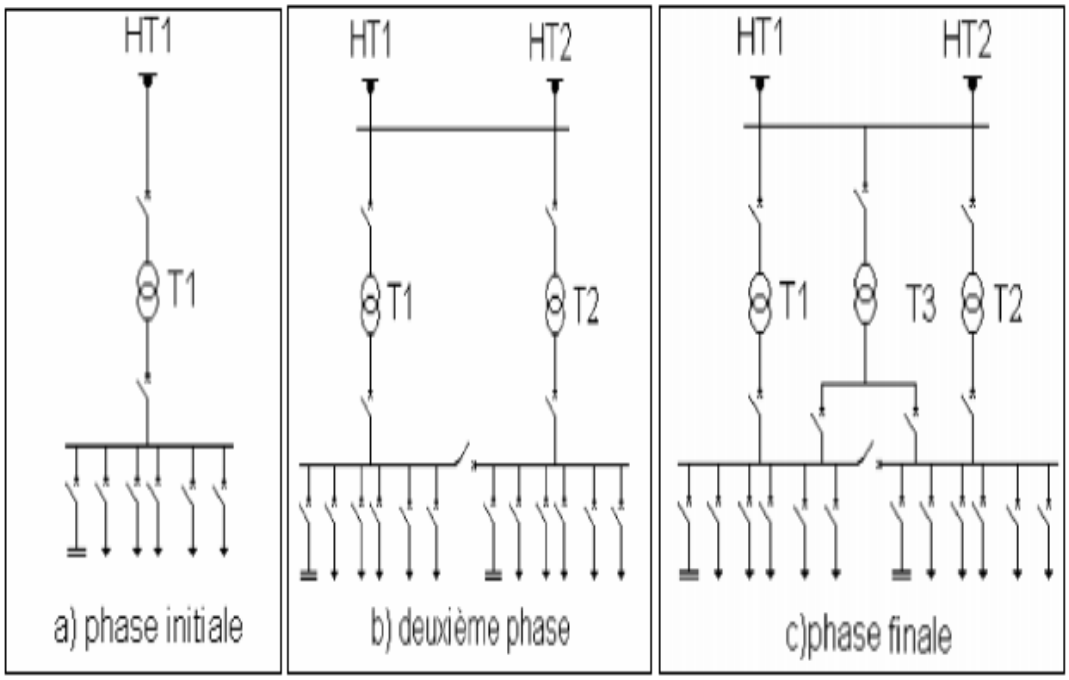


Figure (I.5) : *Schéma de principe des postes sources HTB/HTA(6)*

En exploitation normale, un transformateur peut alimenter plusieurs rames, le second étant en secours; ou bien chaque transformateur alimente une rame ou une demi-rame. Les transformateurs ne sont jamais en parallèle, sauf de courts instants pendant un changement de schéma d'exploitation du poste.

Les départs HTA sont regroupés par demi rame en fonction de leur nature (aérien ou souterrain) et de la similarité de leur courbe de charge, c'est-à-dire du type de clients raccordés.

b. les lignes ou départ HTA

Le réseau HTA a une structure arborescente radiale le plus souvent bouclage par une autre demi-rame ou un autre poste source pour la sécurité d'exploitation. Il est en général constitué d'une artère ou ossature principale et de dérivations. Selon la densité des charges à desservir, le réseau de distribution sera réalisé soit en lignes aériennes, soit en câbles souterrains.

c. Réseau HTA aérien

Les zones rurales à faible densité de charge sont alimentées par des lignes HTA aériennes en simple dérivation (figure I.6), traditionnellement moins coûteuses que les câbles enterrés.

Le dimensionnement de ces ouvrages est lié aux chutes de tension maximales admissibles en raison de l'éloignement des charges à desservir.

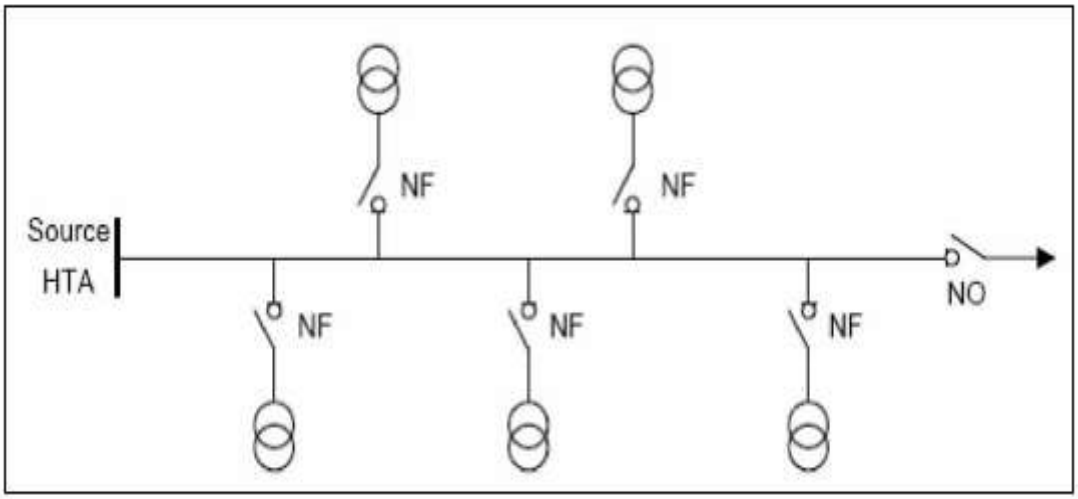


Figure (I.6) : *Simple dérivation(6)*

d. Réseau HTA souterrain

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.7) ou en coupure d'artère (figure I.8). En double dérivation, les postes HTA/BT sont normalement alimentés par le câble de travail (CT), le câble de secours (CS) permet de garantir une bonne continuité de service en cas de défaut. La technique en coupure d'artère est moins coûteuse que la précédente et permet une isolation rapide des défauts, mais nécessite un temps d'intervention plus long.

Le dimensionnement des ouvrages souterrains est principalement lié aux courants admissibles dans les câbles en raison de la densité des charges à desservir.

Les ouvrages de distribution neufs ou les rénovations en zones rurales sont également réalisés en câble enterré depuis les années 1990, en raison de la baisse notoire du surcoût lie à cette technique. De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages.

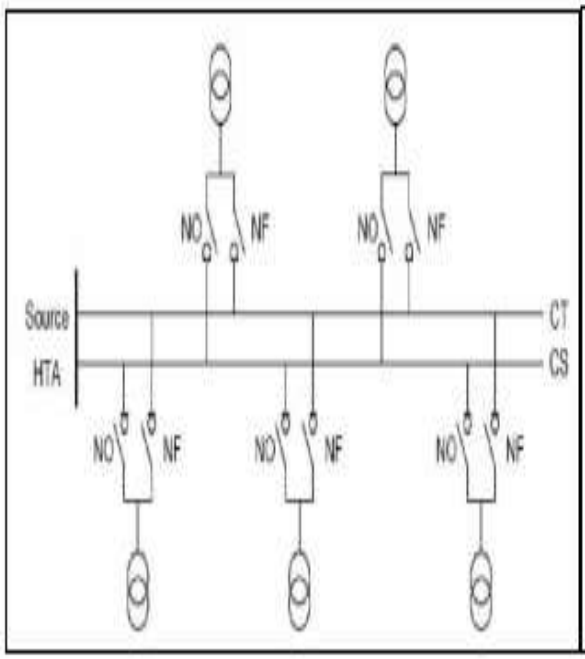


Figure (I.7): *Double dérivation* (6)

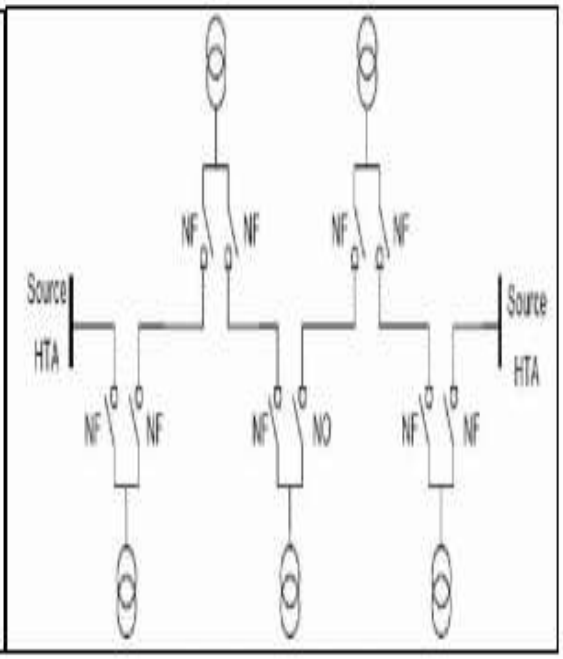


Figure (I.8) : *Coupure d'artère(6)*

Le réseau de distribution à pour rôle de fournir l'énergie électrique aux clients raccordés en HTA ou en BT en assurant une continuité de service et une qualité de l'onde électrique, dans les meilleures conditions de sécurité et au meilleur coût. Pour cela, le gestionnaire du réseau de distribution (GRD) peut agir sur la conception (structure, nombre, dimensionnement,…) et sur les règles d'exploitation.

e. Qualité de service

La qualité de l'onde de tension délivrée par le distributeur doit répondre à des caractéristiques définies par la norme européenne EN 50610 (NF C02-160) de mai 2000. Les éléments principaux en sont reportés dans le tableau I.1.

Caractéristiques	Valeurs admises
Fréquence	BT : 50Hz ± 1% pendant 99.5% du temps sur une année.
	HTA : 50Hz + 4%/ − 6% pendant 100% du temps.
Tension	BT : 230V ± 10% pendant 95% du temps sur une semaine.
	HTA : 20kV ± 10% pendant 95% du temps sur une semaine.
Harmoniques	Taux global de distorsion harmonique $\leq 8\% \cdot U_{nominale}$.
Déséquilibre de la tension	$U_{inverse} \leq 2\% \cdot U_{directe}$ pendant 95% du temps sur une semaine.

Table I.1 _ *Caractéristiques de la tension BT et HTA, d'après [12]*

D'après ces normes on fixe la tension réglementaire de distribution BT a 230/400 V avec des seuils de tolérance de +10 % et -10

% de la tension nominale. De plus, le distributeur s'engage contractuellement à délivrer en tout point du réseau une tension HTA ne sortant pas d'une plage de ± 5 % autour d'une valeur contractuelle Uc elle-même fixée dans une plage de ± 5 % autour de la tension nominale (en général 20 kV).

I.2.2.4 Consommation

Les trois usages classiques de l'énergie électrique sont la production d'énergie thermique (chauffage), lumineuse (éclairage) et mécanique (moteurs électriques). Ces trois applications se retrouvent aussi bien chez les consommateurs résidentiels qu'industriels. Dans les réseaux, les consommateurs sont appelés charges. Ces charges sont caractérisées par leurs puissances active et réactive consommées ou produites. De ces puissances mesurées sur un certain intervalle de temps sont déduites les puissances de pointe (puissance maximale) et moyennes. Pour connaître l'évolution des charges au cours du temps, des études statistiques sont menées sur les réseaux. En mesurant les courants dans les postes de transformation entre les réseaux de transport et de distribution, des courbes de consommation temporelle sont calculées. Ces courbes sont appelées courbes de charge. Elles permettent aux gestionnaires

de réseau de prédire l'évolution de la consommation sur les réseaux et donc, entre autre, de définir les plans prévisionnels de production.

I.2.2.5 Supervision

Le système électrique est piloté continuellement à différents niveaux. Géographiquement, Sonelgaz est le Gestionnaires de Réseaux Transport et distribution d'Electricité érigé en Groupe industriel composé de 34 filiales et 5 sociétés en participation. Ainsi, ses filiales métiers de base assurent la production, le transport et la distribution de l'électricité ainsi que le transport et la distribution du gaz par canalisations.

On compte:

1.La Société Algérienne de Production de l'Electricité (SPE),
2.La Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité (GRTE),
3.La Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport Gaz (GRTG),
4.L'Opérateur Système électrique (OS), chargée de la conduite du système Production / Transport de l'électricité,
5.La Société Algérienne de Distribution de l'électricité et du gaz d'Alger (SDA),
6.La Société Algérienne de Distribution de l'électricité et du gaz du Centre (SDC),
7.La Société Algérienne de Distribution de l'électricité et du gaz de l'Est (SDE),
8.La Société Algérienne de Distribution de l'électricité et du gaz de l'Ouest (SDO).

I.4.1 définition de la production décentralisée

Depuis le début des années 1990, l'organisation du système électrique est remise en cause par divers facteurs économiques, écologiques et politiques. Le ralentissement de la croissance de demande d'énergie électrique conduit à freiner les lourds investissements dans des installations de grande taille [5].

Ce phénomène est accentué par le poids de l'opinion publique : chacun veut une électricité à faible coût, mais personne n'accepte la construction d'une grande centrale à sa porte. D'autre part, l'intérêt croissant accordé à l'environnement pousse les producteurs à développer la production décentralisée d'électricité basée sur l'utilisation des sources d'énergies primaires renouvelables et de la cogénération afin d'augmenter le rendement énergétique des installations de production, ce qui contribue à produire une énergie plus "propre". Ces nouveaux phénomènes, poussent inévitablement au développement rapide

d'une nouvelle catégorie de producteurs :**la génération d'énergie dispersée**, ou **GED** qui sont des producteurs indépendants.

Les GED se distinguent des unités de production centralisée par le fait qu'elles sont le plus souvent raccordées au réseau de distribution, et par leur "petite taille"[SAL_04], bien qu'il n'y ait à l'heure actuelle pas de limite clairement définie entre les catégories centralisée et décentralisée. Cependant, la norme IEEE 1547 sur l'interconnexion des ressources dispersées au réseau électrique ne s'applique qu'aux sources d'une puissance inférieure à 10 MVA.

I.4.2 différents types de la production décentralisée

I.4.2.1 Les énergies renouvelables

A. Hydraulique. Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie Potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. Celle-ci est transformée en énergie électrique par un alternateur entraîné par une turbine mué par la force de l'eau qui est due soit a la hauteur de chute dans le cas de centrales alimentées par une conduite forcée, soit au débit dans le cas de centrales au fil de l'eau. L'énergie hydraulique est de loin l'énergie renouvelable la plus répandue puisqu'elle est également utilisée dans la production centralisée.

B. Eolien. Les aérogénérateurs, ou éoliennes, tirent leur énergie du vent qui est transmise par le rotor et le multiplicateur de vitesse à une génératrice. Cette source d'énergie, qui commence a atteindre sa maturité technologique, est de plus en plus répandue grâce à son fort attrait écologique. Elle est passée devant la production géothermique au niveau mondial en 2000.

C. Géothermie. Les centrales géothermiques utilisent la chaleur de nappes d'eau souterraines qui peuvent atteindre 350 °C dans les zones les plus favorables. Cette eau chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs. La vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique.

D. Solaire photovoltaïque. Les panneaux solaires convertissent directement l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique à courant continu, le solaire photovoltaïque installé dans le monde fin 2001 atteint 1400 MW.

E. Solaire thermique. Les centrales solaires thermiques sont des centrales thermiques utilisant des turbines à vapeur, celle-ci étant produite par chauffage de l'eau via un fluide caloporteur en utilisant le rayonnement solaire concentre sur un échangeur par des miroirs paraboliques.

F. Biomasse et déchets. Certaines centrales thermiques à flamme utilisent comme source primaire des combustibles issus de la biomasse (bois, biogaz, paille, déchets organiques, etc.) ou des déchets industriels et domestiques.

G. Marémotrice. Les centrales marémotrices peuvent s'apparenter à des centrales hydrauliques au fil de l'eau à ceci près que les turbines sont réversibles pour profiter du flux et du reflux des marées. Cette source d'énergie, malgré sa disponibilité considérable, reste anecdotique car elle nécessite la construction de barrages qui modifient les sites côtiers en causant un ensablement ou un envasement du site.

H. Hydrolienne. Les centrales hydroliennes utilisent l'énergie cinétique de la houle dont l'énergie provient du vent. De nombreuses solutions techniques ont été imaginées, mais l'hostilité du milieu sous-marin compromet sérieusement leur développement à l'heure actuelle.

I.4.2.2 Les énergies non renouvelables

A. Energies fossiles (gaz, charbon, pétrole). Les technologies utilisant ces énergies primaires sont nombreuses et bien éprouvées, ce qui leur confère un grand intérêt économique. Les principales technologies sont:

- le thermique à flamme, basé sur des turbines ou micro turbines vapeur;
- les turbines à gaz et cycles combinés de cogénération ou tri génération;
- les moteurs atmosphériques, diesel, etc.

B. Hydrogène. Les piles à combustible produisent directement de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène par réaction inverse de l'électrolyse de l'eau. C'est une énergie

sur laquelle beaucoup d'espoirs sont fondés, bien que l'hydrogène ne se trouve pas sous forme directement exploitable dans la nature, il faut en effet de l'énergie pour le produire.

I.4.2.3 La cogénération

La cogénération électricité – chaleur est une technique permettant de récupérer la chaleur produite par toute microcentrale électrique proche de bâtiments et fonctionnant à haute température, qu'il s'agisse de centrales thermiques classiques ou de certains types de piles à combustible. Le rendement énergétique global d'une telle installation peut atteindre 90% et l'utilisation locale de la chaleur produite permet d'éviter une consommation supplémentaire d'énergie pour le chauffage des bâtiments.

I.4.2.4 avantage et potentiel de la production décentralisée

Les GED peuvent être installées près des sites de consommation, réduisant ainsi le coût de transport, les pertes en lignes, et l'appel de puissance réactive au niveau du poste source. D'autre part, le temps d'installation est plus court que pour la production centralisée et les sites d'installation sont plus faciles à trouver. Enfin, les nouvelles technologies mises en oeuvre sont plus propres; et l'utilisation des producteurs décentralisés en cogénération améliore nettement le rendement énergétique global de l'installation et donc son attrait économique.

Cependant, à l'heure actuelle, les énergies renouvelables, à l'exception de l'énergie hydraulique, ne sont pas rentables. Leur relative compétitivité vient principalement de subventions sous forme d'obligation de rachat par le distributeur à des tarifs élevés. Mais on estime que ces nouvelles filières deviendront compétitives quand elles approcheront leur maturité technologique, et que leur exploitation sera rentable sans subventions autour de 2020. Le mixage de ces ressources avec les ressources classiques devrait alors favoriser grandement le respect de l'environnement.

Le potentiel énergétique de la grande hydraulique est exploité près de son maximum au niveau mondial avec 740 GW installes. En France, 90 % des ressources sont déjà exploités. La petite hydraulique en revanche, dispose d'un potentiel d'évolution de 1700 MW.

I.5 impacts de la production décentralise sur les réseaux de distribution

De précédentes études montrent qu'un taux de pénétration croissant de production décentralisée n'est pas sans impacts prévisibles sur l'exploitation future des réseaux de distribution [6], [7]. En particulier, le plan de tension peut être grandement modifie par la présence de GED, au point que la tension risque de dépasser la limite supérieure en certains nœuds du réseau alors qu'elle est maintenue à une valeur normale au poste source. Le plan de protection risque également d'être affecte par un fort taux de pénétration des GED du fait de la puissance de court-circuit qu'elles apportent en aval des protections, et de l'inversion possible des flux de puissance active sur certaines lignes, ainsi que de la diminution du temps d'élimination critique de défauts.

Les GED fournissent de l'énergie près des points de consommation, diminuant ainsi les transits de puissance active et donc les pertes en ligne sur le réseau de transport, mais sont pénalisantes du point de vue de l'exploitation des réseaux de distribution pour les raisons cités plus haut ajoutées aux risques d'oscillations de puissance active et leur corollaire qui est une stabilité dégradée.

Une partie de ces GED à, de plus, des sources d'énergie primaire intermittentes (éolien, solaire) qui ne permettent pas de prévoir aisément la production disponible à court terme. Elles ne peuvent donc pas garantir une puissance de sortie et proposer toute la puissance disponible sur le marché. D'autre part, ces nombreuses sources sont trop petites pour être observables et dispatchings par les gestionnaires de réseaux de distribution et ne participent donc pas, aujourd'hui, aux services système. Cela peut poser des problèmes en cas de fort taux de pénétration si les moyens de réglage classiques de la distribution deviennent inaptes à assurer la tenue en tension. Cela peut contraindre par exemple les gestionnaires de réseaux à engager des investissements non prévus initialement.

Une partie de ces GED produisant par construction du courant continu (pile à combustible, panneau solaire) doit être raccordée au réseau par l'intermédiaire d'interfaces d'électronique de puissance, injectant ainsi des harmoniques nuisibles à la qualité de la tension délivrée.

Enfin, la présence de GED en aval d'un poste source dont le transformateur est équipe d'un régleur en charge régulé par compound âge perturbe son fonctionnement basé sur la mesure du courant absorbe. En effet, la production de puissance par les GED réduit le courant traversant le transformateur, provoquant une action du régleur en charge et diminuant ainsi la tension au niveau du poste source.

I.6- Conclusion

L'ouverture du marché de l'énergie électrique amène d'importants changements dans le système électrique, en particulier dans les réseaux de distribution. L'arrivée prévue de production décentralisée va profondément bouleverser leur fonctionnement. Un certain nombre d'effets bénéfiques pour le consommateur, le producteur, le régulateur et plus largement la société sont à venir. En contrepartie, un certain nombre d'effets néfastes pour le système électrique sont à prévoir.

En particulier, parmi les défis à venir, l'insertion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution risque de bouleverser la gestion de la tension. L'objet du chapitre II est de présenter la problématique future du réglage de la tension dans les réseaux de distribution, les enjeux associés et les solutions possibles.

II.1 Introduction

Les installations de production, de transport et de distribution de l'électricité forment un système très vaste et très complexe du fait notamment de sont fort non linéarité.

De nombreux acteurs, des producteurs aux consommateurs en passant par le réseau, composent et ont des effets varies sur ce système. Chacun de ces acteurs ou combinaison d'acteurs peut avoir des incidences favorables ou défavorables sur la qualité de l'énergie électrique, en termes de tension et de fréquence, ainsi que sur la sûreté des réseaux.

Ces systèmes électriques ont de nombreuses contraintes de fonctionnement. Ils ont la nécessite en premier lieu de maintenir en permanence l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie électrique, celle-ci ne pouvant pas être stockée en grande quantité. Cet équilibre s'établit naturellement dans une certaine mesure, mais au détriment de la stabilité en fréquence et en tension.

Nous nous attacherons en particulier dans ce chapitre à montrer en quoi la tenue de tension est fondamentale pour la sécurité et l'exploitation des réseaux électriques.

Apres quoi nous dresserons un inventaire des moyens de réglage de tension existants à la disposition des gestionnaires de réseau de transport et de distribution.

II.2. Rappel sur l'importance de la tenue de tension et de fréquence dans les réseaux électriques

II.2.1 la sécurité des réseaux

II.2.1.1 La tenue de tension

Pour garantir la stabilité du réseau et la sécurité des matériels, la tension doit être maintenue dans des limites fixées par les règles d'exploitation des réseaux électriques. Ces limites sont définies dans chaque pays selon le type de réseau en fonction de son niveau de tension. La tenue de la tension est donc un des aspects fondamentaux de l'exploitation des réseaux de transport et de distribution. En effet, les limites de tension ne doivent pas être dépassées pour les raisons suivantes [8] :

- Les limites supérieures de tension sont imposées pour tous les niveaux d'exploitation par la tenue diélectrique des matériels, ainsi que par les limites de saturation des

transformateurs. En ce qui concerne les réseaux de distribution, la tension est aussi limitée car une tension trop élevée peut réduire la durée de vie d'appareils utilisateurs.

- Les limites inférieures de tension sont imposées au niveau des réseaux de distribution par le fonctionnement correct des appareils industriels ou domestiques. Au niveau des réseaux, les limites inférieures de tension sont liée sa la sécurité du système électrique dans son ensemble ; une tension trop basse aura les conséquences suivantes :
- Surcharge des éléments de transport (lignes ET transformateurs) par augmentation du courant, ET risque de déclenchement des protections associées;
- instabilité de tension pouvant entraîner Un écroulement de tension;
- perte des éléments de production (stabilité statique des alternateurs, limites de fonctionnement des groupes et de leurs auxiliaires).

II.2.1.2.La tenue de fréquence

De même que pour la tension, la fréquence doit impérativement être maintenue dans les limites contractuelles. Les principaux problèmes apparaissant en cas d'excursion non maîtrisée de la fréquence sont les suivants [8] :

- rupture de synchronisme des alternateurs pouvant entraîner la perte de groupes en cascade;
- limite de fonctionnement des auxiliaires de centrales;
- En cas de baisse de fréquence: saturation des circuits magnétiques de transformateurs ou compensateurs bobines d'énergie réactive entraînant un fonctionnement dégrade et des pertes fer.

II.2.2 Pour l'exploitation normale des réseaux

Dans le but d'étudier l'impact de la tenue de la tension sur la bonne exploitation des réseaux, nous présentons dans la (figure II.1) un modelé équivalent monophasé en π d'une ligne triphasée couramment utilise dans l'étude des réseaux.

Ce modèle est valable pour des lignes courtes ou moyennes dans lesquelles on peut négliger les phénomènes de propagations. P et Q désignent dans ce paragraphe les puissances active et réactive transitées par phase.

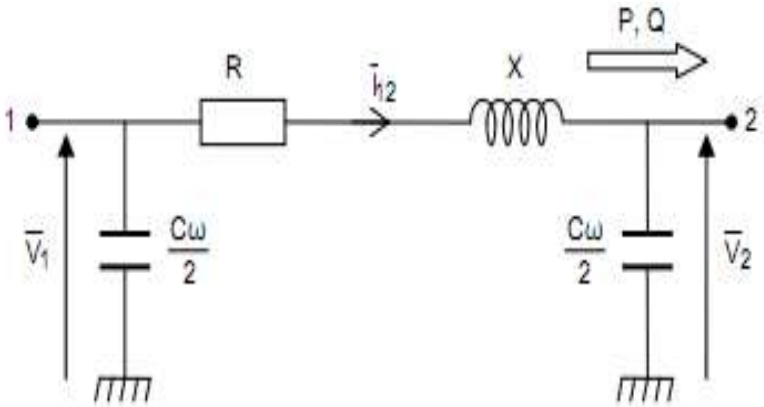


Figure II.1 : *Modèle de ligne en Π*

A ce modèle de ligne en Π, on peut associer un diagramme de Fresnel reliant les tensions aux éléments de ce modèle (figure II.2).

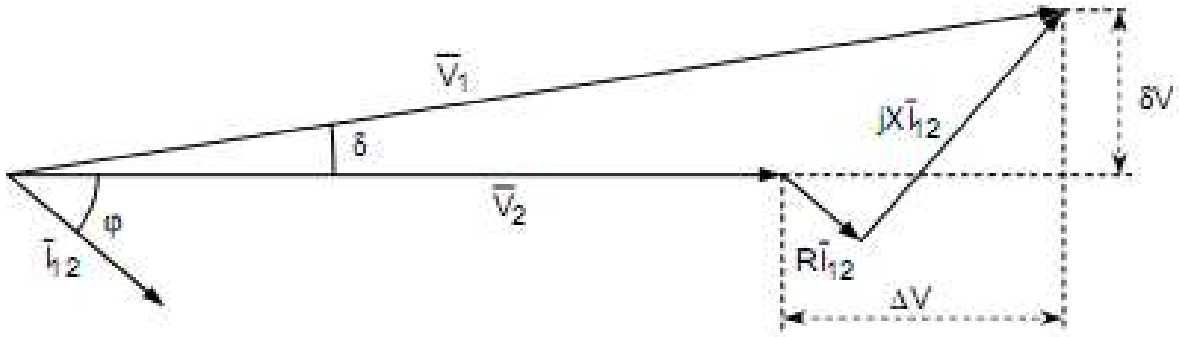


Figure II.2 : *Diagramme de Fresnel de la ligne en Π*

II.2.2.1 Chutes de tension et pertes Joule

Si l'on connait V2 ainsi que les puissances actives et réactives transitées dans la ligne, on peut alors calculer la chute de tension :

$$\Delta\overline{V} = \overline{V_1} - \overline{V_2} = \frac{RP + XQ}{\overline{V_2}} + j\,\frac{XP - RQ}{\overline{V_2}} \qquad \textbf{(II-1)}$$

De manière générale, on peut considérer que si le déphasage entre les tensions d'entrée et de sortie de la ligne est suffisamment petit (hypothèse d'un réseau peu charge, connue sous le nom d'hypothèse de Kapp), alors la chute de tension est égale à sa projection ΔV :

$$\left|\Delta\overline{V}\right| \approx \Delta V = \frac{RP + XQ}{v_2} \qquad \textbf{(II-2)}$$

La chute de tension sur une ligne est donc liée à la fois à la puissance transmise et a la tension d'exploitation. Un plan de tension élevé permettra donc de réduire les chutes de tension sur le réseau. Les pertes en ligne par effet Joule sont également déterminées par la puissance transmise et la tension d'exploitation. Les pertes Joule par phase s'expriment sous la forme :

$$p_j = R\frac{P^2 + Q^2}{v_2^2} \qquad \textbf{(II-3)}$$

Les pertes Joule triphasées s'expriment donc sous la forme suivante :

$$P_{jr} = 3P_j = \frac{R}{3}\frac{P_T^2 + Q_T^2}{V_2^2} \qquad \textbf{(II-4)}$$

En notant P_T et Q_T les puissances active et réactive triphasées.

L'équation II.4 montre qu'un plan de tension élevé permet également de minimiser les pertes Joule.

II.2.2.2 Puissance transmissible

La puissance transmissible dans les lignes est contrainte par la limite thermique de la ligne ou du câble dans les réseaux de distribution du fait de la résistance non négligeable des conducteurs.

Dans les réseaux, en revanche, la limite de puissance transmissible est en général d'une autre nature [9]. En effet, reconsidérons le schéma de ligne en Π de la (figure II.1) avec une charge connectée au nœud 2.

Dans le cas de lignes de transport HTB, la résistance des lignes est très faible devant leur réactance, et la capacité homopolaire est très grande devant l'impédance de charge. On peut donc assimiler l'impédance entre les points 1 et 2 a la réactance X. On obtient alors le schéma suivant :

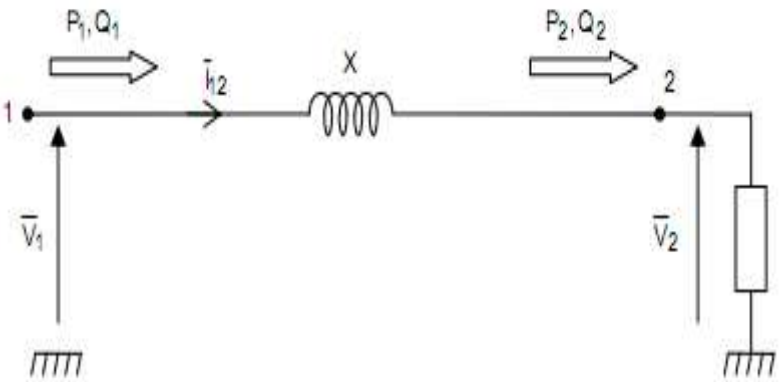


Figure II.3 : *Modèle de ligne simplifié* [8]

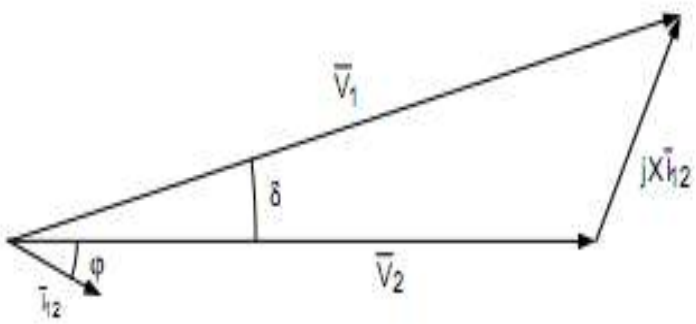


Figure II.4 : Diagramme de Fresnel de la ligne simplifiée [8]

Supposons la tension V1 tenue, c'est-à-dire constante lorsque la charge varie. Si de plus on fait l'hypothèse que la puissance réactive de la charge est nulle (Q2 = 0), ce qui est réaliste en cas de bonne compensation réactive, on peut écrire :

$$X\overline{I_{12}} = \overline{V_1}\sin\delta \qquad \textbf{(II-5)}$$

D ou

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1 V_2}{X}\sin\delta \qquad \textbf{(II-6)}$$

Si rien n'est fait pour maintenir la tension V2 constante quand la charge varie, on aura alors :

$$V_2 = V_1\cos\delta \qquad \textbf{(II-7)}$$

Soit :

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1^{\,2}}{2X}\sin 2\delta \qquad \textbf{(II-8)}$$

La puissance maximale transmissible par phase est donc :

$$P_{\max} = \frac{V_1^2}{2X} \qquad \textbf{(II-09)}$$

Considérons maintenant que la tension V2 aux bornes de la charge est tenue et égale à V1 en module (ce qui implique que Q2 n'est plus nulle en permanence). La puissance maximale transmissible par phase devient alors :

$$P_{\max} = \frac{V_1 V_2}{X} \approx \frac{V_1^2}{X} \qquad \textbf{(II-10)}$$

Ainsi on double la puissance maximale transmissible dans une ligne en tenant sa tension au nœud extrémité. D'une manière générale, plus la tension est tenue en un grand nombre de nœuds du réseau, plus la puissance transmissible par ce réseau sera élevée. Il apparaît également préférable d'exploiter les réseaux électriques sous une tension la plus

élevée possible dans la limite de tenue des matériels afin d'augmenter la capacité de transport des lignes.

Cependant, la figure II.4 permet d'écrire :

$$Q_2 = \frac{V_1 V_2 \cos\delta - V_2^2}{x} \qquad \textbf{(II-11)}$$

Le maintien de V2 constant implique donc le contrôle local de Q2.

D'une manière générale, la tenue de la tension en point donne du réseau nécessite la compensation de la puissance réactive fournie ou consommée en ce point.

II.2.3. Les services système

C'est pour faire face à ces contraintes et pour garantir la qualité du service que certains acteurs du système électrique sont appelés a fournir un ensemble de services au réseau dénommes services système. Ils regroupent certaines priorités dont les principales sont les suivantes :

- Assurer à tout instant l'équilibre entre production et consommation de puissance active par le réglage hiérarchise de fréquence;
- Garantir le maintien de la tension dans les limites contractuelles en tout point du réseau par le réglage hiérarchise de tension;
- Garantir une réserve opérationnelle d'énergie supplémentaire qui doit être disponible dans un délai de 30 minutes pour faire face à des besoins imprévus;
- Maintenir par des actions adéquates les performances du système électrique en cas de perturbation, notamment pour limiter les transits de puissance a des niveaux admissibles par les matériels de transport et pour améliorer la stabilité du réseau;
- assurer la capacité de redémarrage (black-start) du système électrique après Un black-out en maintenant prêts au démarrage certains générateurs dédies, et en assurant la continuité de services avec leurs seuls auxiliaires, c'est-à-dire en îlotage, de certains générateurs pour effectuer des renvois de tension sur le réseau.

II.3. Réglage hiérarchise tension / puissance réactive (U/Q) dans les réseaux

II.3.1 Tension et puissance réactive : des grandeurs locales

La tension est une grandeur locale qui est sensible à de nombreux facteurs. Elle dépend principalement des forces électromotrices des générateurs qui sont les sources de tension du système électrique, mais aussi des charges et des transits de puissance réactive qui induisent des chutes de tension entre les sources et les points de consommation.

Limiter les transits de puissance réactive permet de réduire sensiblement les pertes par effet Joule, et donc de réduire la production de puissance active nécessaire.

Cela permet aussi par conséquent de faciliter le réglage du plan de tension grâce à la diminution des chutes de tension.

Du fait de ces chutes de tension, la puissance réactive se transporte mal. Il est donc nécessaire dans la mesure du possible de produire l'énergie réactive au plus près (au sens de la distance électrique) de ses points de consommation, c'est à dire de réaliser un équilibre local entre les puissances réactives produites et consommées. C'est ce que l'on appelle la compensation de puissance réactive. Afin de préserver au mieux l'équilibre local production consommation de puissance réactive et de maintenir à tous les niveaux la tension dans les limites contractuelles, les gestionnaires des réseaux de transport et de distribution disposent de moyens de réglage adaptes à chaque niveau.

Les éléments influant sur la tension et l'énergie réactive sont schématiquement présents dans la (figure II.5).

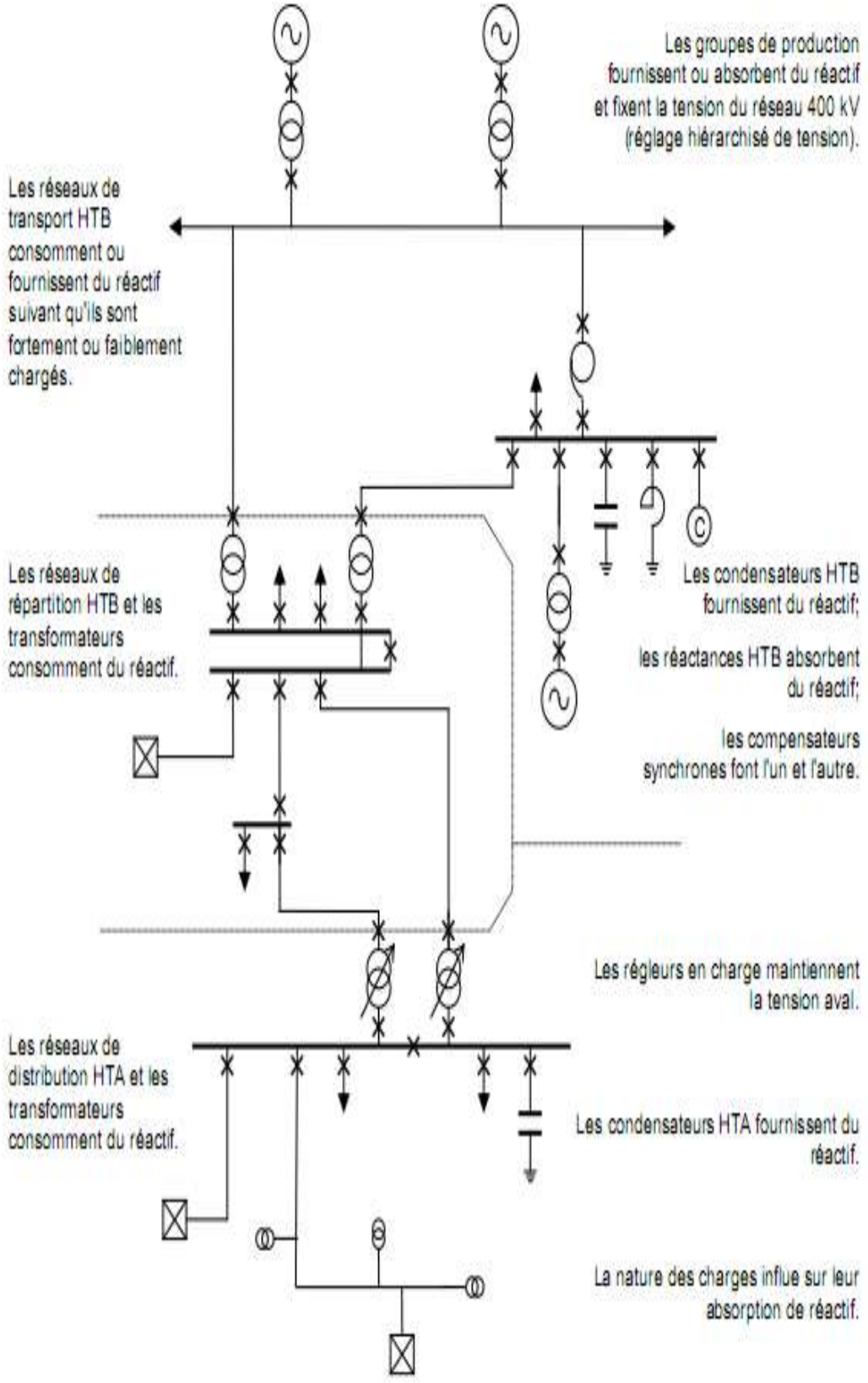


Figure II.5 : *Synthèse des moyens de réglage de tension* [9]

Divers évènements pouvant survenir sont susceptibles d'affecter plus ou moins gravement la tension et obligent donc les gestionnaires des réseaux à contrôler et arrérager permanence la tension.

Ces évènements peuvent être classes dans deux catégories :

- **Les évènements Lents**: Ce sont des évolutions lentes de la charge qui suivent une évolution journalière aisément prévisible a grande échelle, mais à laquelle il faut ajouter une composante aléatoire autour de cette valeur moyenne dont l'importance relative augmente en raison d'une réduction du foisonnement quand la taille de la zone considérée diminue.
- **Les évènements rapides**: Il s'agit d'évènements discrets ou de grande amplitude qui affectent brutalement la tension: modification du plan de production, reconfiguration, court-circuit, coupures, creux de tension, etc.

II.3.2 Le réglage hiérarchisé de tension

Le réglage de la tension sur les réseaux de transport et de répartition nécessite une coordination temporelle et spatiale des actions de contrôle pour assurer un contrôle rapide et performant, et pour éviter des interactions entre différentes actions de contrôle qui pourraient avoir des conséquences graves sur la stabilité et la sûreté du réseau.

En effet, des consignes contradictoires reçues simultanément par un régulateur risqueraient de provoquer des oscillations qui peuvent être critiques. Ce contrôle est réalisé par un système hiérarchise qui se compose de trois niveaux distincts représentes dans la (figure II.6).

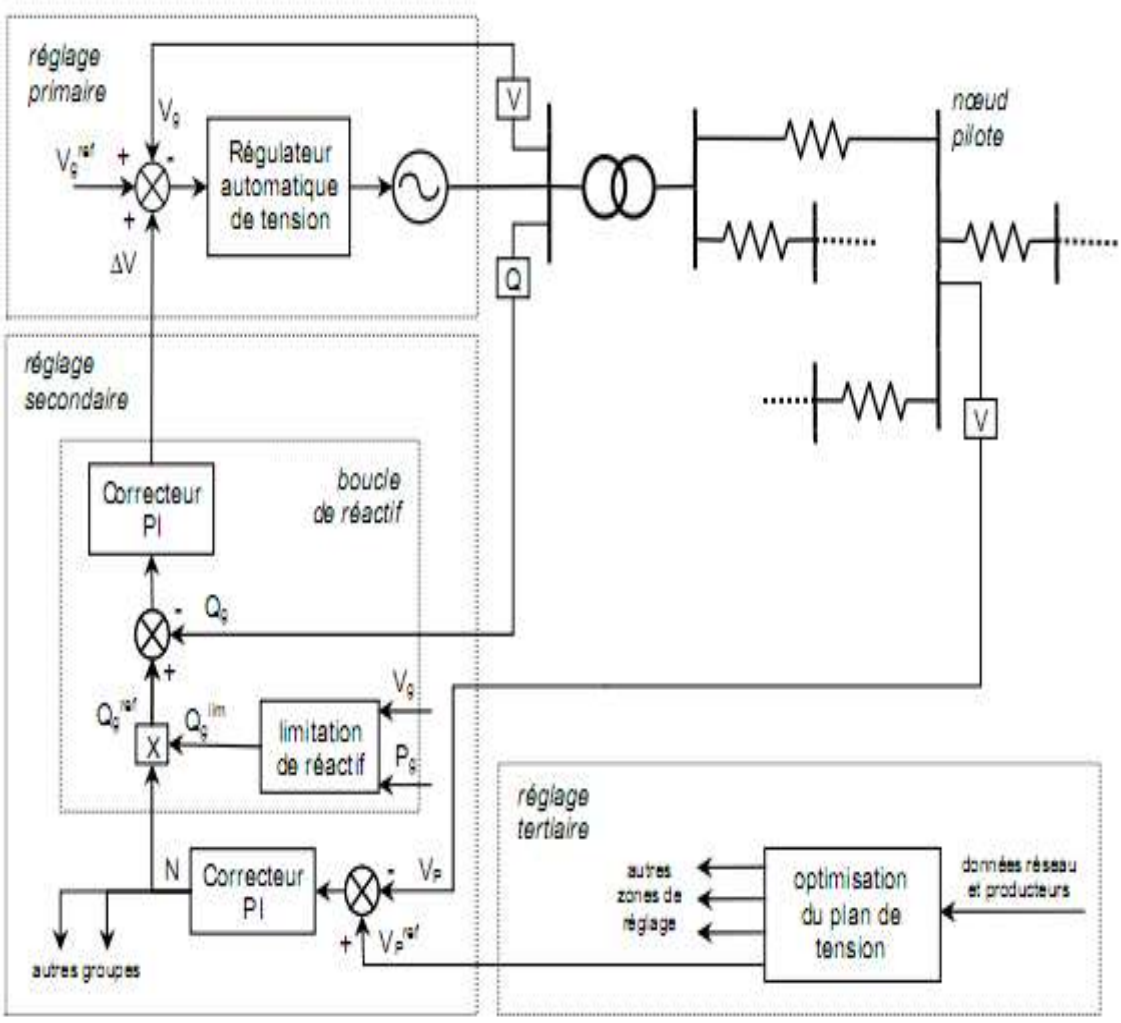


Figure II.6 : *Organisation du réglage hiérarchisé de tension*[9]

V_g et V_{gref} représentent les tensions mesurée et de consigne de l'alternateur ;

ΔV Est la correction de la tension de référence de l'alternateur élaborée par la boucle de gestion de puissance réactive;

Q_g et Q_{gref} représentent les puissances réactives mesurée et de consigne de l'alternateur ;

Q_{lim} est la limitation de puissance réactive que peut fournir ou absorber l'alternateur, c'est adire la réserve disponible, elle peut dépendre de la tension et de la puissance active produite si elle n'est pas fixée ;

N est le niveau de participation (compris entre -1 et +1) envoyé à tous les groupes participant au réglage, ce niveau détermine la proportion de la réserve de puissance réactive devant être mobilisée ;

$\mathbf{V_p}$ et $\mathbf{V_{pref}}$ représentent les tensions mesurées et de consigne du nœud pilote.

Les trois niveaux hiérarchiques du réglage de tension sont alors ceux décrits ci-après

II.3.2.1 Le réglage primaire

Le réglage primaire agit au niveau local avec une constante de temps de l'ordre de 100 ms sur la tension aux bornes des groupes pour faire face à des variations rapides de la tension qui peuvent être induites par des variations de demande de puissance réactive, par des défauts ou par des manœuvres sur le réseau. En cas de variation de plus grande amplitude de la tension, l'action des régleurs en charge des transformateurs vient soulager le réglage effectue par les alternateurs.

Le réglage primaire est le premier à intervenir suite à une perturbation. Il se caractérise par une action basée sur des critères locaux en asservissant la tension aux bornes du groupe à une valeur de référence.

Le réglage primaire permet donc, dans la limite des réserves primaires des groupes, de maintenir l'équilibre local entre la production et la consommation de puissance réactive et de répondre rapidement aux fluctuations aléatoires de la tension.

II.3.2.2 Le réglage secondaire

Le réglage secondaire de tension (RST) a pour but de faire face de manière coordonnée a de fortes, mais lentes fluctuations de la tension a l'échelle régionale, ce que le réglage primaire ne peut assurer seul. Le réglage secondaire est automatise et centralise par régions dites zones de réglage, ces zones de réglages doivent être indépendantes du point de vue de la tension. Cela signifie que chaque zone est en théorie insensible à toute variation de tension pouvant survenir dans une zone voisine. Il a pour objet de limiter les transits de puissance réactive sur les lignes d'interconnexion, et de maintenir la tension en certains nœuds représentatifs de la tension de chaque zone à sa valeur de consigne.

Ces nœuds spécifiques sont appelés nœuds pilotes (il y en a un par zone de réglage).

Cette action est réalisée en élaborant une correction des valeurs de consigne de chaque groupe participant au réglage secondaire. Le correcteur du réglage secondaire

élabore un niveau de participation à partir de l'écart entre la consigne de tension du nœud pilote et la tension mesurée en ce même nœud.

Ce niveau est ensuite utilise par la boucle de réactif de chaque alternateur pour déterminer la correction à apporter sur la consigne de tension de ce dernier.

Afin de protéger le réseau contre d'éventuelles oscillations dues a des actions contradictoires des réglages primaire et secondaire, ce dernier a un temps de réponse nettement plus long que le précèdent : il est de l'ordre de la minute.

II.3.2.3 Le réglage tertiaire

Le réglage tertiaire, manuel, effectue en France par le dispatching national, consiste à réévaluer, à intervalles de quinze minutes, les consignes de tension des nœuds pilotes de chaque zone de réglage selon des critères technico-économiques dont les principaux sont

Les suivants [8]:

- Exploiter le réseau en assurant au mieux sa sûreté;
- Respecter les contraintes de fonctionnement des matériels;
- Minimiser les pertes et les coûts de production;
- Utiliser au mieux la capacité des ouvrages de transport.

Il a pour but d'assurer une bonne tenue globale du plan de tension, et d'éviter des situations engendrant des surcoûts ou des risques pour le système électrique. Les consignes de tension des nœuds pilotes sont calculées par un optimal power flow, ou OPF, en tenant compte des critères précédemment citent.

II.4.Le réglage secondaire coordonné

II.4.1 Une évolution du RST

Le réglage secondaire coordonne de tension (RSCT) est une évolution du réglage secondaire qui connait quelques limitations susceptibles de devenir de plus en plus Pénalisantes à mesure que l'on exploite le réseau au plus près de ses limites.

La première de ces difficultés provient du découpage du réseau en zones théoriquement indépendantes et de l'utilisation d'un unique point pilote censé être représentatif du niveau de tension de l'ensemble de la zone. Or, le couplage effectif entre zones voisines augmente avec le développement des réseaux, ce qui a pour conséquence, combine avec l'utilisation d'un unique point pilote, de dégrader tension.

D'autre part, ce type de réglage connait des limites structurelles et fonctionnelles [10]:

- L'établissement d'un niveau de participation unique pour une zone de réglage ne tient pas compte des distances électriques de chaque groupe au nœud pilote, créant des déséquilibres dans la participation des groupes au réglage. Le RST italien prend en compte les distances électriques [11];
- Le RST n'intègre pas complètement les limitations de tension ou les limites de fonctionnement des groupes. En particulier, la vitesse de variation de consigne ne tient pas compte du temps de réponse des groupes;
- Les paramètres des boucles de contrôle sont fixes, Ce qui ne permet pas d'adapter le réglage aux conditions de fonctionnement.

Le réglage coordonne sur des zones plus vastes permet de plus d'exploiter le réseau plus près de ses limites de fonctionnement et donc de différer de nouveaux investissements.

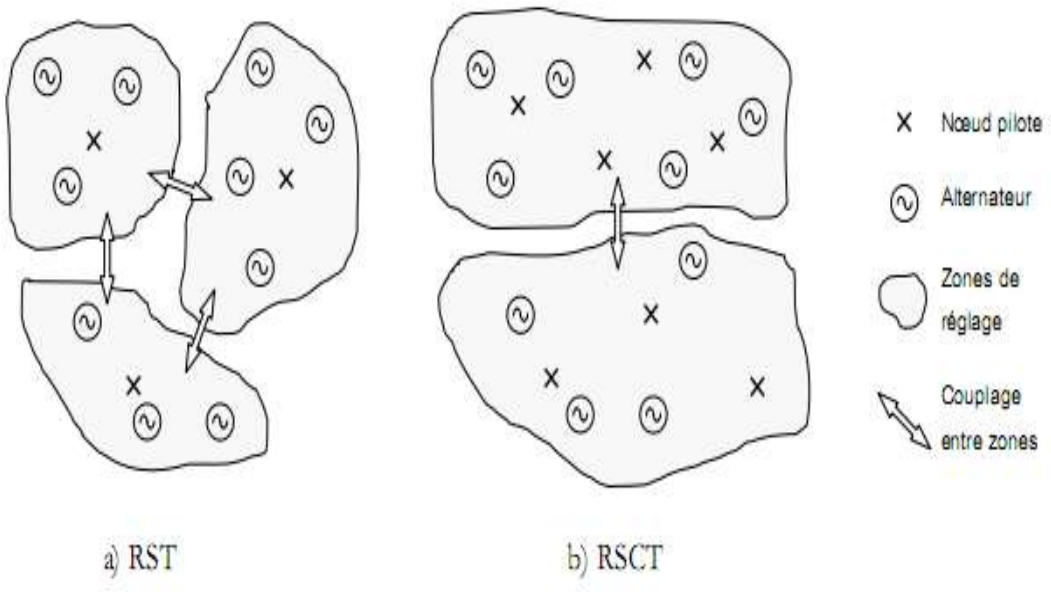


Figure II.7 : *Les réglages RST et RSCT* [10]

Le rôle du RSCT dans les réseaux est de réguler la tension en plusieurs nœuds pilotes par zone de réglage de manière a mieux maitrisé le plan dé tensions sur des zones de réglage élargies par rapport au RST. Il y a donc plusieurs écarts de tension à minimiser. Le RST base sur un correcteur PI (proportionnel – intégral) devient dans ce cas inopérant car le rattrapage à chaque instant des tensions des différents nœuds pilotes donnerait des facteurs de participation (consignes de puissance réactive) incohérents entre eux pour chaque groupe. Autrement dit, il est impossible de superposer plusieurs RST sur une même zone de réglage.

II.4.2 L'idée du RSCT

La solution mise en œuvre par EDF passe par une optimisation multi – objectif des consignes de tension des groupes participant au réglage, ce qui a de plus l'avantage de rendre possible une gestion intelligente de la production de puissance réactive en tenant compte des réserves de chaque groupe et du besoin de compensation locale de réactif lie à l'évolution de la charge.

Le RSCT est base sur un calcul d'optimisation des consignes de tension des groupes pour tenir la tension en plusieurs points pilotes à l'intérieur de chaque zone de réglage.

Le plan de tension global est ainsi plus finement contrôle et les zones de réglage peuvent être sensiblement élargies par rapport à celles utilisées pour le réglage classique, ce qui réduit l'effet néfaste qui couplage entre zones adjacentes comme l'illustre (la figure II.7). La fonction objective utilisée pour faire l'optimisation comporte les trois objectifs suivants décrits ci-dessous.

a. Tenue de la tension aux nœuds pilotes

Le premier et principal objectif du RSCT est de contrôler par l'entremise des alternateurs la tension aux nœuds pilotes qui sont choisis pour être représentatifs du plan de tension de l'ensemble de la zone de réglage sur lequel il est applique.

Autrement dit, l'objectif de tenue de la tension aux nœuds pilotes consiste à minimiser l'écart entre les tensions mesurées aux points pilotes et les valeurs de références correspondantes afin d'approcher au mieux du plan de tension optimal régulière ment redéfini par le réglage tertiaire effectuent au niveau du dispatching national.

Ce qui s'exprime comme suit :

Minimiser $$FV_{P_{i\in\alpha G}}(V_i^{ref}) = \sum (V_j^{ref} - V_j)^2 \qquad \textbf{(II-12)}$$

Où **FVP** est la fonction objectif à minimiser ;

$\mathbf{V_j^{ref}}$ **et** $\mathbf{V_j}$ sont respectivement le tension de référence et mesurée au nœud pilote j

αG et **αP** sont respectivement les ensembles des indices des nœuds générateurs et des nœuds pilotes.

b. Gestion de la puissance réactive

L'autre objectif important est de s'assurer que l'on demande à chaque groupe une participation à l'effort de réglage en rapport avec ses réserves de puissance réactive disponible. L'objectif de gestion de la puissance réactive consiste donc à minimiser l'écart entre le niveau relatif de production de puissance réactive de chaque groupe (rapporte a sa propre réserve) et la référence définie pour toute la zone, ceci afin que chaque groupe participe à l'effort de compensation de puissance réactive en fonction de ses réserves et des distances électriques au point de consommation, ce qui n'est pas le cas avec le réglage RST.

La réserve de puissance réactive d'un alternateur a un moment donne est définie comme la quantité totale de puissance réactive que peut fournir cet alternateur à cet instant, compte tenu des diverses limitations dues principalement à l'échauffement des conducteurs et a la stabilité statique.

Cet objectif peut alors s'exprimer de la manière suivante :

$$\text{Minimiser} \qquad FQ_{G_{i\in\alpha G}}(v_i^{ref}) = \sum_{j\in\alpha G}(Q_j^{MAX}.q^{ref} - Q_J)^2 \qquad \textbf{(II-13)}$$

Ou $\mathbf{FQ_G}$ est la fonction objectif a minimiser ;

$\mathbf{Q_j^{MAX}}$ et $\mathbf{Q_j}$ sont respectivement la réserve de puissance réactive et la puissance réactive

Produite par le groupe connecté au nœud j,vérifiant la condition $|Q_j| \leq Q_j^{MAX}$

$\mathbf{q^{ref}} = \sum \mathbf{Q_i} / \sum \mathbf{Q_i^{MAX}}$ est la valeur de référence uniforme de production de puissance réactive.

c. Tension aux bornes des alternateurs

La minimisation des deux fonctions objectif précédentes peut conduire, dans certains cas a des excursions incontrôlées des consignes de tension susceptibles d'être fournies aux régulateurs de tension des alternateurs les plus éloignés des points pilotes a l'issue des calculs d'optimisation.

Afin de prévenir de telles déviations, il faut également considérer un objectif de maintien de la tension aux bornes des alternateurs.

Cela se traduit par la minimisation de l'écart entre les tensions mesurées aux bornes des groupes participants et les valeurs de référence correspondantes. Cela revient à modérer l'action des objectifs $\mathbf{FV_P}$ et $\mathbf{FQ_G}$, et donc a réduire son efficacité, mais également conférer une meilleure stabilité au réglage. Cet objectif peut s'exprimer de la manière suivante

$$\text{Minimiser} \qquad FV_{G_{i\in\alpha G}}(V_i^{ref}) = \sum_{j\in\alpha G}(v_i^{ref} - v_j)^2 \qquad \textbf{(II-14)}$$

Où $\mathbf{FV_G}$ est la fonction objective à minimiser;

Et $\mathbf{V_j^{ref}}$ et $\mathbf{V_j}$ sont respectivement la tension de référence et la tension mesurée au nœud générateur j.

II.4.3.La fonction objectif pour le RSCT

Afin de produire un réglage de tension performant, les consignes de tension $\mathbf{V_j^{ref}}$ des groupes devront être calculées de façon à minimiser les trois objectifs décrits ci-dessus.

Or il n'y a évidemment aucune raison pour que ces trois objectifs soient minimaux pour le même point de fonctionnement. Il existe donc plusieurs points de fonctionnement possibles pour lesquels il ne sera plus possible de minimiser l'un des objectifs qu'au détriment des deux autres.

L'ensemble de ces points de fonctionnement, ou solutions non dominées, constitue la frontière de Pareto [13], [14]. Pour déterminer le choix d'un point privilégie de cette frontière, il faut favoriser un objectif par rapport aux autres sans pour autant les négliger. Autrement dit, il est nécessaire de pondérer les différents objectifs en fonction de la priorité que le gestionnaire du réseau de transport souhaite leur donner.

Nous pouvons ainsi écrire une fonction objective globale à minimiser :

$$\begin{aligned} F_{OBJ_{I\in\alpha G}}(V_i^{ref}) &= \mathrm{A}_{v_p}\sum_{j\in\alpha P}(V_J^{ref} - V_J)^2 \\ &+ A_{Q_G}.n_{Q_G}.\sum_{j\in\alpha G}(Q_j^{MAX}.q^{ref} - Q_j)^2 \\ &+ A_{V_G}.n_{v_G}.\sum_{j\in\alpha G}V_j^{ref} - V_j) \end{aligned} \qquad \textbf{(II-15)}$$

Avec $\mathbf{n_{Vp}}$, $\mathbf{n_{QG}}$ et $\mathbf{n_{VG}}$ les indices de normalisation;

et $\mathbf{A_{Vp}}$, $\mathbf{A_{VG}}$ les coefficients de pondération.

Pour tenir compte de l'évolution des différentes grandeurs en fonction de l'évolution de V_G au cours des itérations,on introduit une déviation de chaque grandeur objectif liée à la déviation de $\mathbf{V_G^{ref}}$ par les matrices de sensibilité $\mathbf{S_{VP,VG}}$ et $\mathbf{S_{QG,Vg}}$ **:**

- $\mathbf{\Delta V_i(\Delta V_G)} = \sum \mathbf{S_{Vi,Vk}}\ \mathbf{\Delta V_k}$ est la déviation de tension au nœud pilote j induite par une déviation de tension ΔV_G;

- Et $\mathbf{\Delta Q_i(\Delta V_G)} = \sum \mathbf{S_{Qi,Vk}}\ \mathbf{\Delta V_k}$ est la déviation de puissance réactive au nœud générateur j induite par la même déviation de tension $\mathbf{\Delta V_G}$.

On définit alors la fonction objective complète de la manière suivante :

$$\begin{aligned} F_{OBJ}(V_i^{ref})_{i\in\alpha G} = {} & \Lambda_{V_P}\cdot n_{V_P}\cdot\sum_{j\in\alpha P}\left(\alpha(V_j^{ref}-V_j)-\sum_{k\in\alpha G}S_{V_j,V_k}\cdot\Delta V_k\right)^2 \\ & +\Lambda_{Q_G}\cdot n_{Q_G}\cdot\sum_{j\in\alpha G}\left(\alpha(Q_j^{MAX}\cdot q^{ref}-Q_j)-\sum_{k\in\alpha G}S_{Q_j,V_k}\cdot\Delta V_k\right)^2 \\ & +\Lambda_{V_G}\cdot n_{V_G}\cdot\sum_{j\in\alpha G}\left(\alpha(V_j^{ref}-V_j)-\Delta V_j\right)^2 \end{aligned} \qquad \text{(II.16)}$$

Où α est le gain du "contrôleur".

II.4.4.Les contraintes

Afin de respecter en tout point du réseau les limitations de tension d'exploitation normale, et de protéger les alternateurs contre des variations de consignes trop rapides, la minimisation de la fonction objective II.16 doit se faire en respectant les contraintes suivantes [10], [15] :

$$\begin{cases} (1)\quad V_i^{\min} \le V_i + \sum_{k\in\alpha G} s_{v_j,v_k}.\Delta V_k \le V_i^{MAX} & i\in\alpha P \\ (2)\quad V_i^{\min} \le V_i + \Delta V_i \le V_i^{MAX} & i\in\alpha G \\ (3)\quad a_i(Q_i + \sum_{k\in\alpha G} S_{Q_i,v_k}.\Delta V_k) + b_i\,\Delta V_i \le c_i & i\in\alpha G \\ (4)\quad |\Delta V_i| \le \Delta V_i^{MAX} & i\in\alpha G \end{cases} \qquad \textbf{(II-17)}$$

Avec ai, bi, et ci les coefficients directeurs du diagramme de fonctionnement (P, Q, U) du générateur i, ce diagramme dépend de la puissance active générée par l'alternateur.

Les contraintes (1) et (2) signifient que les tensions aux nœuds pilotes et aux nœuds générateurs après application des nouvelles consignes calculées par le RCT ne doivent pas sortir de l'intervalle **[V_{imin} ; V_{imax}].** La contrainte (3) donne les limites de fonctionnement des alternateurs, et la contrainte (4) donne la déviation de tension maximale admissible pour les alternateurs.

II.5 Réglage de la tension dans les réseaux de distribution actuels

II.5.1.Compensation de puissance réactive au poste source

Les réseaux de distribution disposent de divers moyens de compensation d'énergie réactive localises aux postes sources. Ils permettent de limiter le transit de puissance réactive sur les transformateurs et ainsi d'éviter une trop forte dégradation du plan de tension.

Les moyens de compensation les plus fréquemment utilises sont les bancs de capacités, les compensateurs synchrones (plus souvent utilises au niveau des postes de transformation 400/220 kV et 220/60 kV) et les compensateurs statiques d'énergie réactive (FACTS : Flexible AC Transmission System).

II.5.2. Régleurs en charge

Les transformateurs des postes sources sont également équipes de régleurs en charge qui permettent de modifier le rapport de transformation par pas de 1 %. Ceux-ci permettent d'ajuster la tension des jeux de barres HTA en fonction de l'évolution des charges et des fluctuations de la tension amont.

Le premier changement de prise suite à un dépassement de seuil se fait avec un retard Δt1 d'une minute, ceci afin de laisser passer des variations de tension transitoires dues aux connexions ou déconnexions de charges importantes (figure II.8). Le retard Δt2 pris en compte pour les changements de prise suivants est réduit à 10 s.

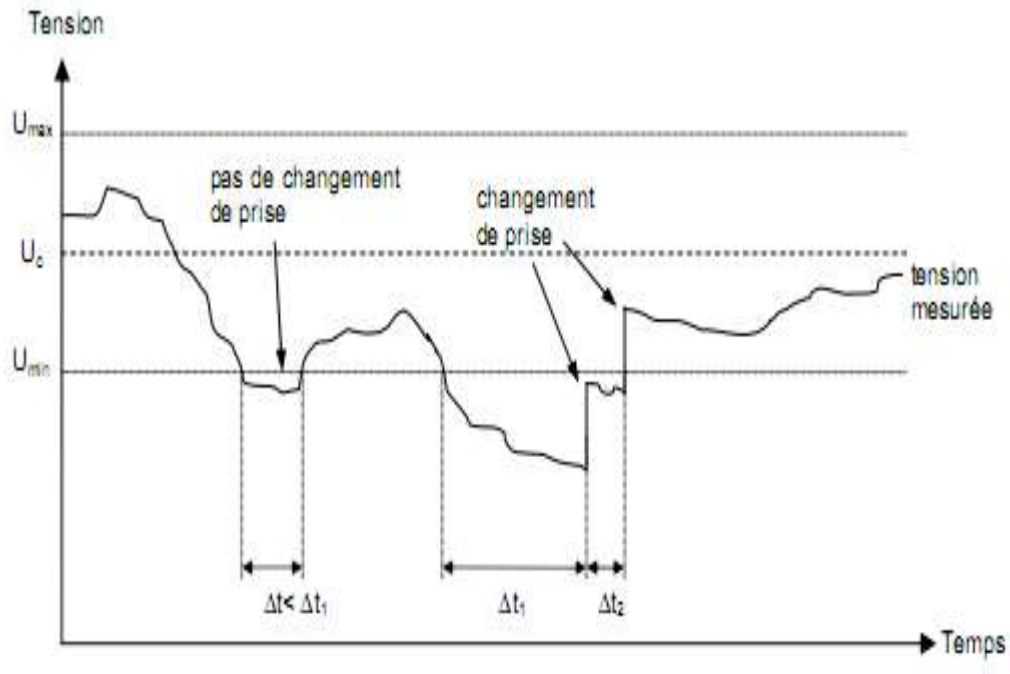


Figure II.8 : *Principe de fonctionnement du régleur en charge*

Le réglage de la tension HTA peut se faire avec ou sans compoundage. Le compoundage est une technique qui prend en compte, par mesure du courant dans le transformateur (et donc de l'état de charge moyen du réseau), les chutes de tension dans le réseau aval. Cela permet de tenir la tension en un point du réseau diffèrent du poste source : centre de gravité, nœud prioritaire ou critique, etc.

II.6. Conclusion

On a montré dans ce chapitre l'importance du réglage de la tension et de la fréquence dans les réseaux de transport interconnectes. On a également vu les moyens de réglage actuellement existants au niveau du transport et des postes sources, mais aucun réglage de tension n'existe dans les réseaux de distribution publics en aval des postes sources. Cependant, certains industriels connectes au réseau HTA peuvent disposer de leur propres moyens de compensation de réactif (bancs de capacité, SVC) pour ramener leur facteur de puissance (tan φ) a une valeur inférieure a 0.4 pour éviter de payer des pénalités. Ils apparaissent alors comme une charge consommant peu ou pas de puissance réactive, mais ne règlent pas pour autant la tension. Or le taux de pénétration croissant de production décentralisée rend nécessaire le réglage de la tension dans certaines circonstances.

III.1 Introduction

Le développement des différents secteurs de l'industrie et la demande croissante en énergie représentent de plus en plus un défi scientifique et écologique car comme cité plus haut, les énergies fossiles sont limitées et polluantes mais ont l'avantage d'être bien maitrisées, on cite comme exemple les turbines à gaz ou les groupes diesel. Néanmoins, les études portées sur les nouvelles sources d'énergie dites renouvelables peuvent changer la donne. Différentes études, tant expérimentales que théoriques font actuellement l'objet de recherches soutenues à travers le monde.

L'approche la plus commune est l'étude expérimentale qui repose sur la pratique et la manipulation, d'autres études portent sur les méthodes de simulation informatique qui à partir de modèles mathématiques simples représentant les composants de base arrivent à des modèles mathématiques très complexes qui simulent le comportement réel du sujet d'étude.

Pour ce qui concerne l'intégration de ces différentes énergies au réseau de la distribution électrique, on passe généralement par des études théoriques avec des simulations informatiques qui permettront au finale une meilleure compréhension lors de l'étude expérimentale. Beaucoup de chercheurs et d'ingénieurs à travers le monde travaillent sur le sujet, des programmes ont été développés dans ce but comme le logiciel CYME développé par CYME International T&D ou des programmes de développement comme MATLAB qui intègrent leurs propres outils d'analyses et de simulations.

Notre sujet qui est la réalisation d'un outil de simulation du PV et sont intégration au réseau de distribution suit le même schéma, afin de réaliser notre simulation nous allons voir les différents modèles de chaque composant de base en commençant par la cellule solaire passant par l'MPPT et l'onduleur jusqu'au model du réseau de distribution, chacun de ces composants de base dispose de modèles mathématiques certains sont complexes d'autre ne le sont pas, en fonction du model utilisé la simulation diffère, par exemple les simulations faites avec les outilles de MATLAB ne sont pas exactement les même qu'avec CYME afin de maitriser notre simulation nous allons nous même choisir les différents modèles mathématiques de chaque composant et leurs interactions.

III.2 Généralités sur les panneaux PV

Nous aborderons en premier lieu le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales ainsi que les limites du modèle théorique. Nous décrirons par la suite les différents constituants d'un système d'adaptation trouvés dans la littérature afin d'avoir des sorties continues ou alternatives, Nous finirons par présenter les différents résultats d'une intégration d'un tel système au réseau.

III.2.1 Les cellules PV

La photopile ou la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de semi-conducteurs de différents types, elle constitue l'élément de base d'un générateur photovoltaïque. Son rôle est de transformer de manière directe l'énergie reçue par le soleil en énergie électrique avec un certain rendement qui est caractéristique du semi-conducteur utilisé dans la fabrication, cette transformation ce fait par l'effet photovoltaïque.

Les différentes technologies de cellule dépendent des matériaux semi-conducteurs utilisés, la filière silicium reste la plus dominante à 99% d'autre filière commence a émergé dite « composite » comme (GaAs) et le tellurure de cadmium (noté CdTe) ou encore le Cu(In,Ga)Se2,(cuivre indium/gallium sélénium noté CIGS) appelées filières CIS pour les rendements records qu'elles présentent de 16,5 % pour CdTe de 20 % [15].

III.2.2-Schémas équivalent d'une cellule PV

Technologiquement, une cellule PV est proche d'une diode PN de par sa construction, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en œuvre, le schéma suivant est l'une des représentations possible de cette dernière

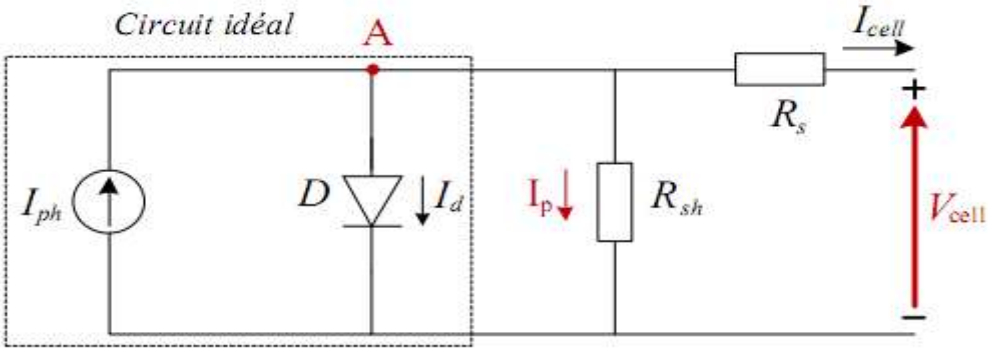


Figure III.1 : *Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque* ***[15]***

Ce modèle n'est pas universel, de nombreux auteurs ont proposé des modèles plus sophistiqués qui représentent avec plus de précision le phénomène photovoltaïque comme le model à deux diodes. En effet, ces prototypes tiennent compte de certains phénomènes tels que la recombinaison des électrons et les courants de fuite liés aux diodes. Cependant, le modèle présenté offre un bon compromis entre simplicité et précision.

La cellule présentée comporte en réalité une résistance série (R_s) et une résistance shunt (R_{sh}). Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I=f(V):

La résistance série : elle représente la résistance interne de la cellule, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles [15].

La résistance shunt : elle est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend la façon dont celle-ci a été réalisée [15]. Pour notre travaille la résistance shunt sera négligé de ce fait on obtient le model simplifié de la cellule PV.

III.2.3-Caractéristique courant tension

La tension maximale de la cellule est d'environ 0,6V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert V_{OC}. Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit I_{CC} et dépend fortement du niveau d'éclairement.

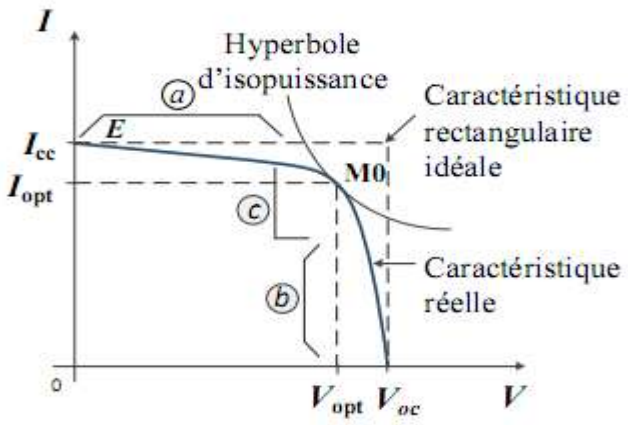


Figure III.2 : *Caractéristique d'une cellule photovoltaïque réelle [16]*

Les générateurs électriques sont généralement classifiés en source de courant et en source de tension. Une cellule PV a un comportement hybride, elle peut fonctionner en source de tension ou en source de courant selon le point de fonctionnement. Ainsi, la caractéristique I -V se divise en trois zones :

- La zone « a » : où la cellule se comporte comme un générateur de courant Icc proportionnel à l'éclairement.

- La zone « b » : où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{OC}.

- La zone « c » : où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

Le point M0 représente le point de puissance maximale.

L'énergie lumineuse permet la séparation des pairs électron-trou, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement entraine une augmentation de paires électron-trou séparées. Le courant I_{ph} produit reste proportionnel à l'ensoleillement avec un courant d'obscurité inchangé et une légère augmentation de la tension en circuit ouvert. Au final, le point de puissance maximum du panneau se décale vers les puissances supérieures [17].

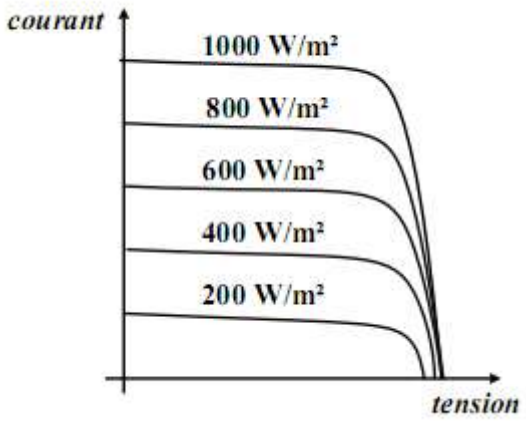


Figure III.3 : *Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique I=f(V) [18]*

Bien qu'importante dans le comportement des cellules photovoltaïques, la température est souvent négligée, à savoir que sur 100% d'énergie incidente, une très faible proportion est réfléchie sur la surface du capteur, 10 à 15% en est extraite sous forme d'énergie électrique mais le reste de l'énergie incidente(soit plus de 80%) sera dissipé sous forme de chaleur, d'où l'augmentation de la température de la cellule

Quand la température augmente, la tension en circuit ouvert de la cellule diminue, alors que le courant de court-circuit n'augmente que légèrement, ce qui provoquera une baisse de puissance maximale de la cellule [18].

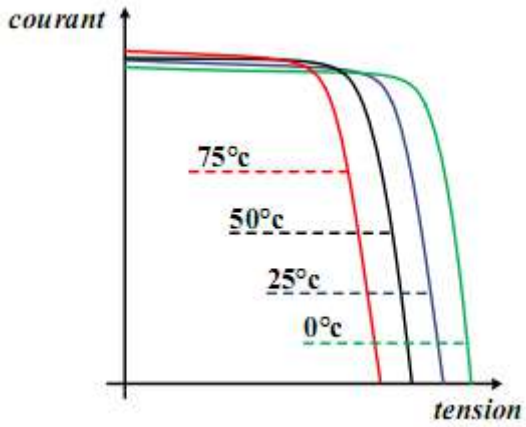


Figure III.4 : *Influence de la chaleur sur la caractéristique I=f(V) [19]*

III.2.4-Générateur PV

La cellule photovoltaïque constitue l'élément fondamental d'un générateur électrique. Elle délivre une puissance très faible, pour la majorité des applications domestiques ou industrielles.

Les cellules sont triées afin qu'elles aient toutes à peu près les mêmes caractéristiques, puis assemblées en : série, parallèle, et série-parallèle pour constituer le module photovoltaïque le montage d'un groupe de ce dernier en série-parallèle constitue un générateur photovoltaïque

La tension délivrée par une cellule photovoltaïque est limitée à la tension du gap du semi -conducteur utilisé, c'est pour cela qu'on connecte plusieurs cellules en série afin d'augmenter la tension de sortie. Ces cellules sont traversées par le même courant et la tension du générateur est proportionnelle à leur nombre.

En termes d'équations on aura :

$$\begin{cases} V_{cons} = N_s V_{co} \\ I_{cc} = I_{cc_{ns}} \end{cases} \qquad \textbf{(III-1)}$$

Avec :

- $V_{co\ ns}$: Tension aux bornes de Ns cellules en série
- N_s : Nombre de cellules en série
- V_{co}: Tension aux bornes d'une seule cellule
- I_{cc} : Courant traversant une cellule
- $I_{cc\ ns}$: Courant traversant Ns cellules en série

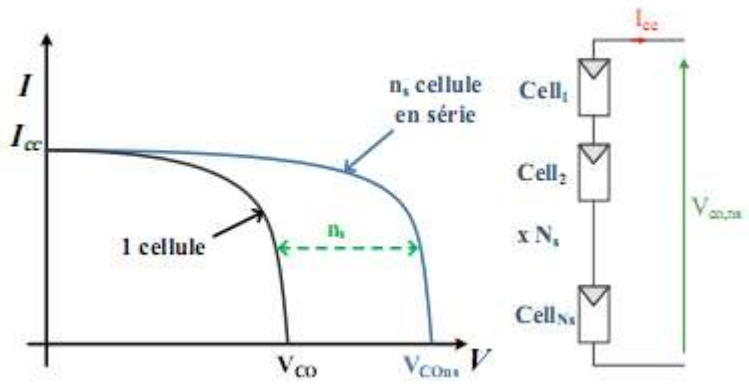


Figure III.5 : *Caractéristique résultante du regroupement de n série cellules en série [20]*

La caractéristique I-V représentée par la figure III.5 du groupement série est donc obtenue par addition des tensions à un courant donné.

Pour l'association en parallèle, on doit vérifier que les tensions des photopiles sont identiques, et le courant obtenu représente le produit entre le courant de la cellule élémentaire et le nombre de ces cellules pour une tension qui reste la même.

$$\begin{cases} I_{ccnp} = N_p I_{cc} \\ V_{ocnp} = V_{oc} \end{cases} \quad \textbf{(III-2)}$$

Avec :

- I_{ccnp} Courant traversant N_p cellules en parallèle
- N_p Nombre de cellules en parallèle

- V_{conp} Tension aux bornes de N_p cellules en parallèle

La caractéristique suivante représente le groupement parallèle. On voit bien que le courant est proportionnel au nombre de photopiles.

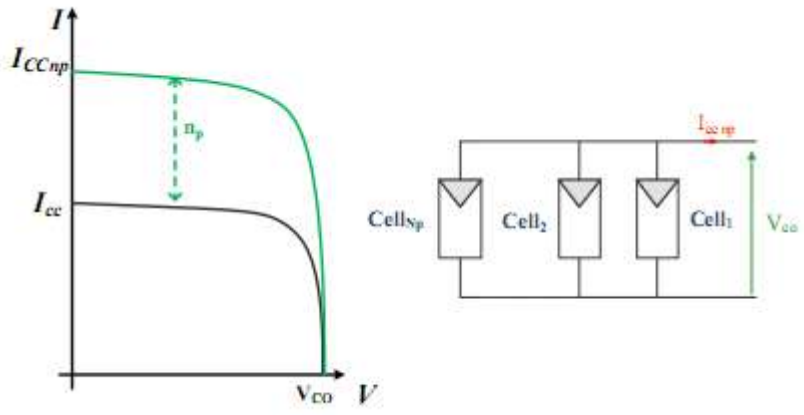


Figure III.6 : *Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle [20]*

On utilise comme système de protection des cellules une diode by-pass, et pour la protection du panneau une diode anti retour

III.3-Etage d'adaptation

L'alimentation de la charge par panneau photovoltaïque peut se faire par couplage direct, mais cela impliquerait un fonctionnement au fil du soleil, à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Ce couplage implique donc l'acceptation d'une adaptation forcément non parfaite sur toute la plage de fonctionnement.

Il devient nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation afin d'adapter la puissance aux nécessités de l'installation, cet étage peut comprendre des convertisseurs (DC/DC, DC/AC)

III.3.1-Convertisseur DC-DC (Hacheur)

Les hacheurs ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. Ils peuvent être isolés ; et comportés un transformateur assurant l'isolation galvanique, ou non isolés [20].

Les convertisseurs non isolés peuvent être partagés en deux types en fonction de leur comportement et du sens de l'énergie qu'ils transfèrent, on distingue ainsi [20] :

Les hacheurs non réversibles qui permettent le transfert de l'énergie de la source vers la charge seulement et les hacheurs réversibles où la source peut fonctionner en charge et inversement. Il est donc possible d'inverser le sens de parcours de l'énergie. On distingue trois types de hacheurs réversibles selon le type de conversion :

- Les hacheurs réversibles en courant
- Les hacheurs réversibles en tension
- Les hacheurs réversibles en courant et en tension.

Les convertisseurs utilisés dans les systèmes PV pour générer les courants et les tensions souhaités sont :

Les convertisseurs de type BUCK (abaisseurs) dans lesquels $V_o < V_i$

Les convertisseurs de type BOOST (élévateurs) dans lesquels $V_o > V_i$

Les convertisseurs de type BUCK-BOOST qui peuvent fonctionner en BUCK ou en BOOST en fonction du rapport cyclique α.

Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un rendement élevé.

Le hacheur dans le système PV a pour rôle d'optimiser le transfert d'énergie du générateur PV vers la charge. Ceci se fait via la commande de l'interrupteur en utilisant un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui recherche le point de puissance maximal et fait fonctionner le système en ce point.

Comme le montre la figure III.7, ce point de puissance maximale varie en fonction de la température, de l'irradiation et de la charge.

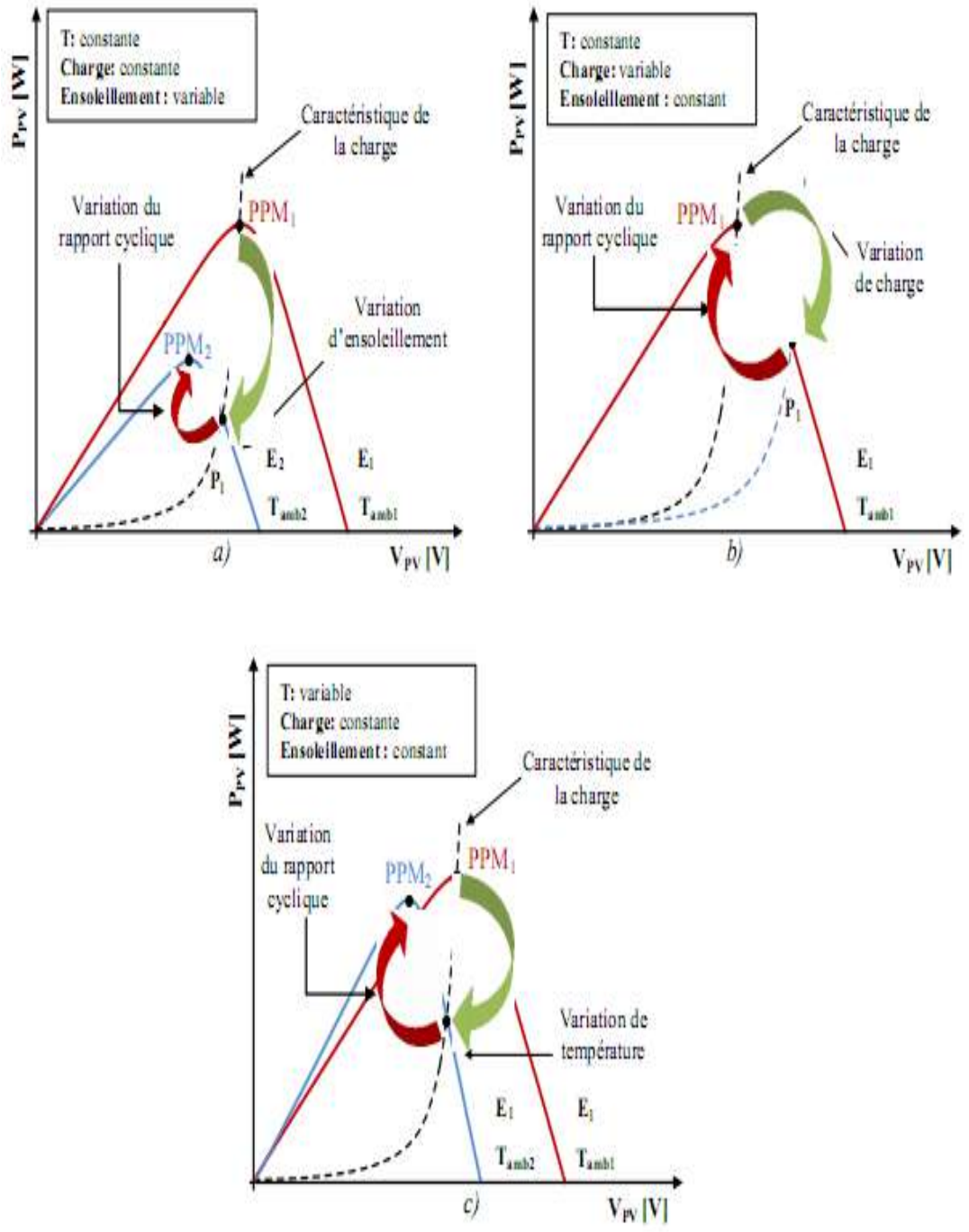


Figure III.7 : *Variation de la puissance maximale en fonction de(a) l'ensoleillement, (b) la charge, (c) la température [21]*

Il existe plusieurs techniques pour la recherche du point de puissance maximale, on peut citer la technique Perturb and Observe (P&O), Incrémental Conductance ou encore la commande par logique floue.

Parmi toutes les méthodes qui existent, Perturb and Observe et Incrémental Conductance sont les plus utilisées, ceci est dû à leurs simples implémentations, leurs rapidités à trouver le PPM ainsi que certaines autres raisons économiques [22].

Le point de puissance maximale change lorsqu'il y a un changement d'irradiation et/ou de température, l'algorithme P&O considère ce changement comme une perturbation plutôt qu'un changement de conditions de travail et ceci peut conduire à des résultats faux du PPM. Cependant ce problème peut être évité en utilisant la méthode Incrémental Conductance, puisqu'elle consiste à mesurer deux valeurs : le courant et la tension afin de calculer le PPM. Néanmoins, mise à part une grande efficacité de cette méthode, l'algorithme est très complexe en comparaison avec l'algorithme précédent et ceci engendre l'augmentation du coût de l'implémentation. Nous devons donc réaliser un bon compromis entre complexité et performance.

III.3.2-Convertisseur DC-AC (Onduleur)

Actuellement l'utilisation des onduleurs, prend de plus en plus du terrain dans les domaines d'applications les plus variés. Devenue incontournable, Le développement des semi-conducteurs entièrement commandables, rapides, et robustes d'une part, et le perfectionnement des techniques de commande d'autre part ont eu un énorme rôle dans l'évolution de ces convertisseurs. Ces progrès ont permis d'intégrer les onduleurs dans des applications particulièrement intéressantes.

On distingue deux principaux types d'onduleurs selon la nature de la source d'alimentation

- Les onduleurs de courant : Alimentés par une source de courant, peu affectés par les variations de tension.

- Les onduleurs de tension : Alimentés par une source de tension continue peu affectée par les variations de courant. Composés de bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Chaque interrupteur comporte un transistor (GTO ou IGBT) et une diode en antiparallèle. Les onduleurs de tension peuvent être à plusieurs niveaux selon les besoins d'utilisation.

Ils peuvent aussi être classés en :

- Onduleurs de tension monophasés : Utilisés généralement pour l'alimentation de charges monophasées de faible puissance, ils peuvent être en pont ou en demi-pont.

- Onduleurs de tension triphasés : Offrant une source de tension triphasée avec une amplitude, phase et fréquence contrôlables et une forme approchant la sinusoïde. Ces onduleurs sont employés dans la moyenne et forte puissance.

L'allure de la tension dépend uniquement de la commande utilisée et non pas de la charge, contrairement à l'allure du courant, Pour un onduleur, lorsqu'on a une charge résistive pure, les diodes sont inutiles. Elles trouvent leurs fonctions seulement dans le cas d'une charge inductive, car elles permettent d'éviter la discontinuité dans la conduction du courant et prennent donc le relais des transistors quand ils sont commandés à la fermeture.

Différentes stratégies de commande peuvent être utilisé on pourrait citer la Commande Pleine Onde ou la Commande par Hystérésis mais on va voir la plus communément utilisé en photovoltaïque la commande MLI.

Elle consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure aux fréquences de grandeurs de sortie et à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables, Les ondes de tensions servent principalement à alimenter à fréquence fixe ou variable, des charges à tension alternative. La modulation de largeur d'impulsions ou la MLI permet de faciliter le filtrage et cela en repoussante les harmoniques de la tension de sortie vers les fréquences élevées. On utilise souvent une électronique de commande analogique ou numérique dans le but de déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs pour avoir une tension qui ressemble le plus à une sinusoïde. La commande MLI assure cette fonction.

C'est la solution la plus utilisée et la plus simple à mettre en œuvre. Elle consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante (basse fréquence), généralement sinusoïdale, avec une onde de modulation ou porteuse (HF) généralement triangulaire d'où l'appellation.

Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs. Pour obtenir un courant quasi sinusoïdal. La tension aux bornes de la charge est fragmentée en plusieurs impulsions de tensions négatives et positives. Cette fragmentation permet, si elle est habillement calculée, d'éliminer les harmoniques gênants, qui sont proches du fondamental en les repoussant vers les hautes fréquences.

Notre MLI est une MLI engendrée si la modulante est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande :

1. L'indice de modulation **« m »** : Il est égal au rapport de la fréquence de la porteuse et celle de la modulante

$$m = \frac{f\,'(porteuse)}{f\,(\text{mod}ulante)} \qquad \textbf{(III-3)}$$

2. Le coefficient de réglage « r » : Il est égal au rapport de l'amplitude de la modulante et celle de la porteuse.

$$r = \frac{Amp(\text{modulante})}{Amp(porteuse)} \qquad \textbf{(III-4)}$$

III.4-Généralités sur le réseau électrique

Un réseau électrique est un ensemble d'installation permettant d'acheminé de l'énergie électrique ver différents consommateurs constitué de lignes et postes électriques, il fonctionne a différent niveau de tension une gestion dynamique de ce dernier doit être assuré pour garantir sa stabilité.

On a différent type de réseau électrique selon sa structure le réseau peut être ;

- Maillée : les postes électriques sont reliés entre eux par de nombreuses lignes électriques, apportant une grande sécurité d'alimentation.
- radiale ou bouclée : la sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée.
- arborescente: la sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne coupe l'ensemble des clients en aval.

Ses dernier son utilisé dans les réseaux de distribution MT et BT

III.4.1-Réseaux de transport

Les réseaux de transport sont à haute tension (HTB) (de 50 kV à 400 kV) et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrices d'électricité.

Les grandes puissances transitées imposent des lignes électriques de forte capacité de transit, ainsi qu'une structure maillée (ou interconnectée). Les réseaux maillés garantissent une très bonne sécurité d'alimentation, car la perte de n'importe quel élément (ligne électrique, transformateur ou groupe de production) n'entraîne aucune coupure d'électricité .

III.4.2-Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs ils sont de structure arborescente et reçoive de l'énergie à partir d'un poste source. Il existe deux sous niveaux de tension :

- les réseaux moyenne tension (anciennement MT devenu HTA de 3 à 50 kV)
- les réseaux basse tension (anciennement BT devenu BTB de 110 à 600V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques.

Contrairement aux réseaux de transport, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population.

III.5-Type d'installation

Lorsqu'on étudie les systèmes PV on voit qu'il existe deux types de mise en œuvre d'une installation photovoltaïque selon qu'elle fonctionne de manière autonome ou qu'elle soit raccordée à un réseau public de distribution d'électricité. Pour cette étude nous nous concentreront sur les installations reliés au réseau, Ce raccordement ne peut se faire qu'après transformation et adaptation aux caractéristiques du réseau. Ces installations produisent de l'électricité qui peut être vendue en totalité ou en partie

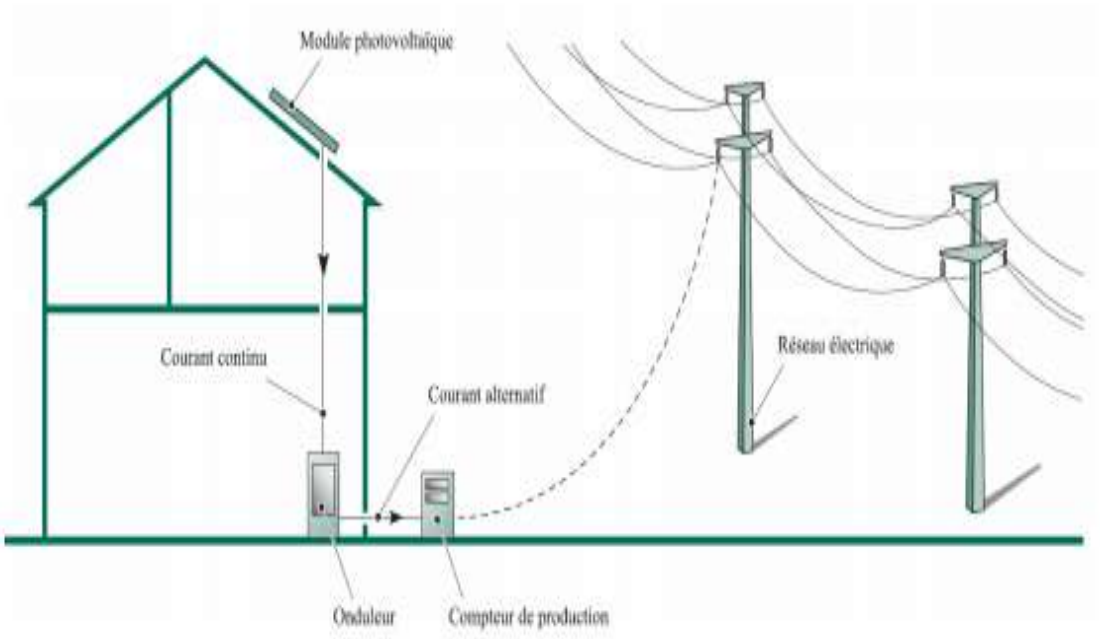


Figure III.8 : *Installation photovoltaïque avec injection dans le réseau*

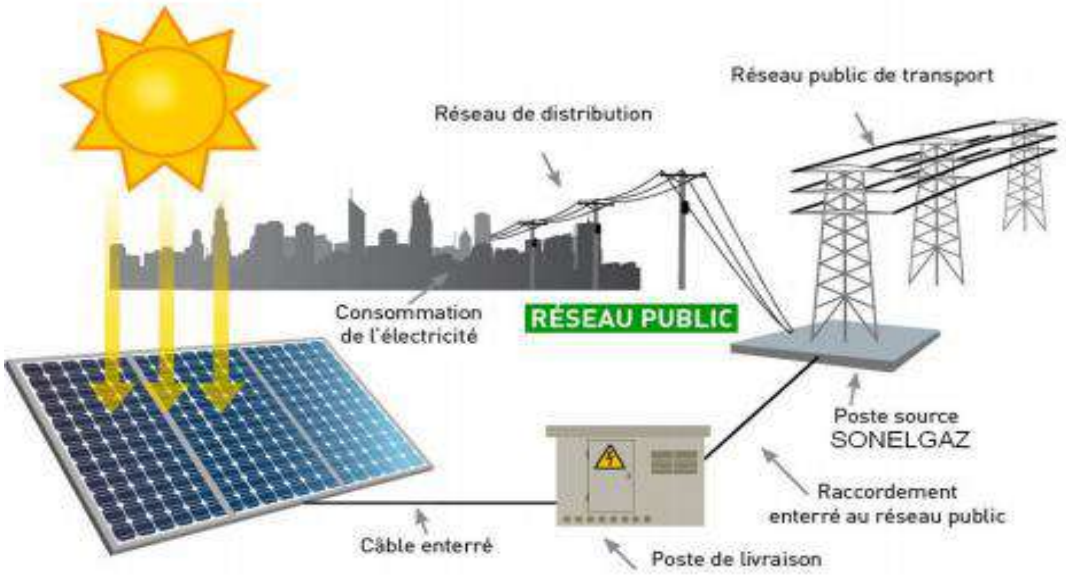


Figure III.9 : *Installation photovoltaïque raccordée au réseau*

III.6-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une petite présentation des différentes technologies qui rentrent dans le fonctionnement d'un système PV, on a notamment parlé des cellules PV qui sont la base des générateurs photovoltaïques et cela à travers un montage série parallèle , on a vue l'étage d'adaptation composé de convertisseur DC/DC contrôlé par un algorithme MPPT type P&O afin d'optimiser la puissance des panneaux, et d'un convertisseur DC/AC (onduleur) a deux niveaux par une MLI, on a aussi eu des notions sur le réseau électrique et ses différents types Le choix des différents systèmes s'est fait en tenant compte de deux critères, la performance et la simplicité des systèmes, ce rapport étant essentielle pour la suite vue qu'on va commencé la modélisation de chaque composant dans le prochain chapitre.

IV.1 Introduction

Afin d'étudier le comportement dynamique ou statique d'un système complet la modélisation de chaque composant du système est nécessaire, dans le chapitre qui suit nous essaierons de modéliser une chaine de production photovoltaïque, nous commencerons par modéliser un panneau photovoltaïque a travers un des model mathématiques puis on passera à la modélisation du hacheur Buck-Boost et de l'onduleur a deux niveaux ensuite de leurs commandes respective P&O pour le hacheur et MLI pour l'onduleur .

Toutes les simulations se feront à travers le logiciel MATLAB et seront visualisées à travers des graphes pour chaque composant du système.

IV.2 Modélisation du panneau PV

Normalement les paramètres internes de chaque panneau sont calculés à travers différentes méthodes de calcule exemple en utilisant la caractéristique I-V de ce dernier Dans cette étude nous utiliserons le model illustré dans la figure III.1 ce dernier fait intervenir un générateur de courant modélisant le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule et une résistance série pour les pertes.

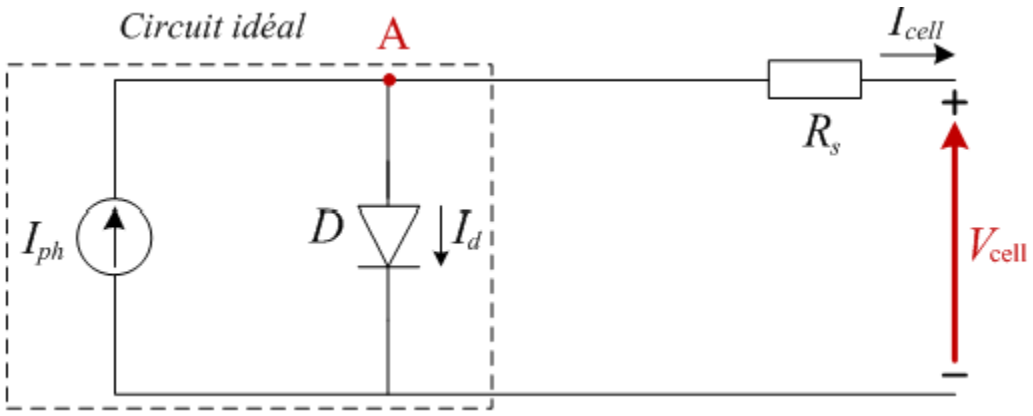


Figure IV.1 *Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.*

Le modèle de la figure IV.1 est dit à cinq paramètres, ces paramètres sont : le photo-courant (I_{ph}), le courant de saturation (I_0), le facteur d'idéalité de la jonction (A), la résistance série (R_{sh}) et la résistance shunt (R_{sh}).

Le choix du modèle se fait en fonction des besoins de l'étude. Le modèle à quatre paramètres offre un bon compromis entre simplicité et précision.

Si on néglige l'effet de la résistance shunt R_{sh} en le considérant infini, on retrouve le modèle à quatre paramètres qui sera utilisé pour notre étude. Et si en plus, on néglige la résistance série, on retrouvera alors le modèle à 3 paramètres.

IV.2.1 Modélisation

L'élaboration du modèle du panneau PV demande l'utilisation des équations de base tirées de la théorie des semi-conducteurs et du photovoltaïque. Ces équations permettent de décrire la caractéristique I-V de la cellule et du module en donnant les expressions des différents courants [22]:

- Le photo-courant : C'est le courant généré par une cellule, il est proportionnel à l'irradiation solaire et légèrement influencé par la température selon l'équation suivante :

$$I_{ph} = I_{sc} \times \frac{E}{E_{ref}} \qquad \text{(IV-1)}$$

$$I_{sc} = I_{sc_trk} \times (1 + (a * (Tak - Trk))) \qquad \text{(IV-2)}$$

Avec:

I_{sc} [A] Courant de court-circuit du panneau (donné par le constructeur)

a [A/K] Coefficient de température par rapport au courant Isc 0.065%

Tak [K] Température ambiante

E [W/m²] Irradiation sur la surface de la cellule

Trk [K] Température de référence (298 K)

E_{ref}[W/m²] Irradiation de référence (1000 W/m²)

- Le courant de saturation inverse de la diode (courant de fuite)

Ce courant varie avec la température et est donné par :

$$I_r = I_{rs} \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^3 \exp\left(\frac{qE_g}{AK}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right) \qquad \text{(IV-3)}$$

$$I_{r_Trk} = \frac{I_{sc_Trk}}{\exp(\frac{qv_{oc_Trc}}{AKT}) - 1} \qquad \text{(IV-4)}$$

Avec:

Eg [eV] Énergie de gap du semi-conducteur (1.1 eV pour le silicium polycristallin à(25°C)

V_{oc} [V] Tension de circuit ouvert du module (donnée par le constructeur)

q [C] Charge de l'électron (1.602. 10^{-19} C)

A Constante d'idéalité de la jonction (1<A<2)

K [J/K] Constante de Boltzmann (1.3805 .10^{-23} J/K)

À partir des expressions décrites précédemment on peut déduire le courant délivré par une cellule :

$$I_a = I_{ph} - I_r \left[\exp(\frac{q(v_c + R_s I_a)}{A * K * Trk}) - 1 \right] \qquad \text{(IV-5)}$$

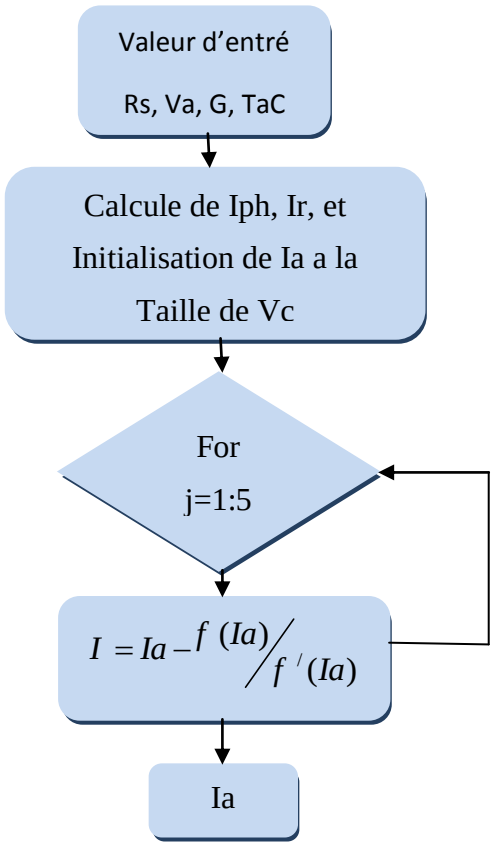


Figure IV.2 *algorithme du panneau SX150s.*

A travers les différentes équations vue précédemment et l'organigramme de la figure IV.2 on obtient un programme qui va générer le courant du panneau utilisé à chaque valeur de tension, de température, d'éclairement, et de résistance série. Le panneau utilisé pour la modélisation est le BP SX150s, ces paramètres dans les conditions standards (25°C, 1000 W/m²) sont donnés par le constructeur mais en vue de voir le comportement de ce dernier sous différentes conditions d'éclairement de température et de résistance série on va permettre la modification de ces paramètres.

IV.2.2 Résultats de la simulation

Pour la première simulation on va voir l'influence de l'éclairement sur le panneau PV cette influence est caractérisée par un changement significatif du courant I ce qui induit un changement de puissance du panneau et cela pour des valeurs d'éclairement allant de 100 a 2000W/m²

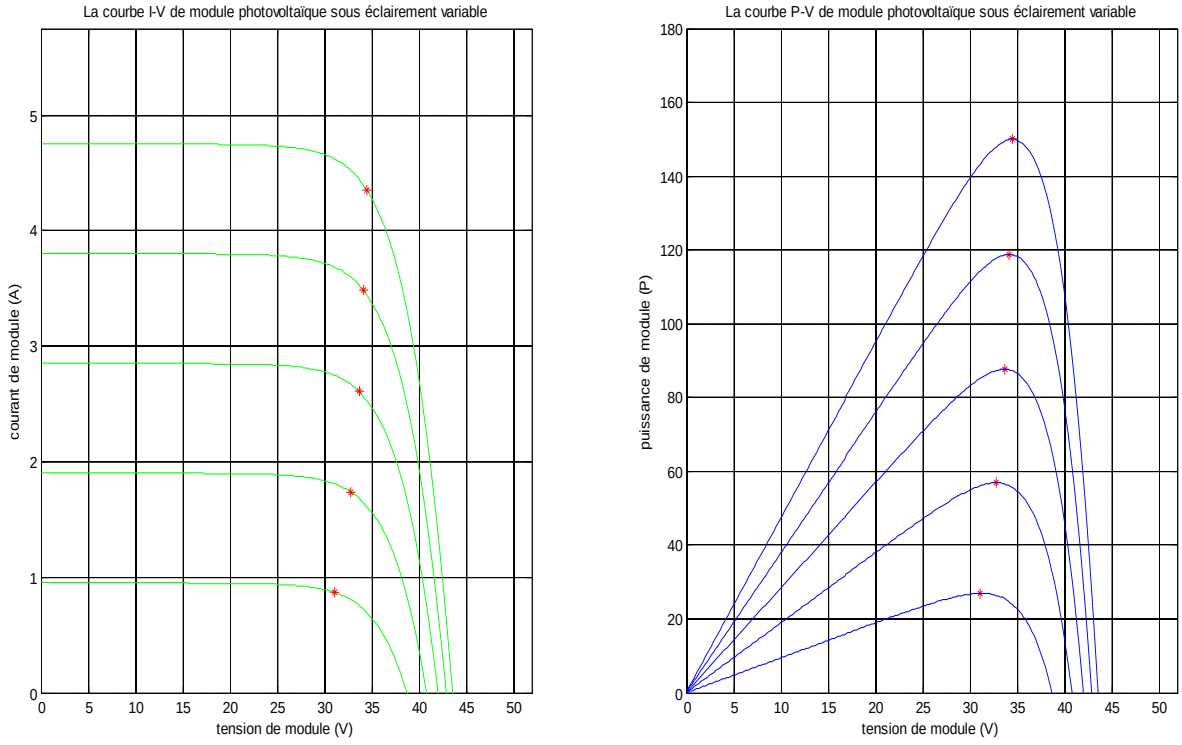


Figure IV.3 *influence de l'éclairement sur la courbe I-V et P-V.*

Pour la deuxième simulation on va voir l'influence de la température sur le panneau PV cette influence est caractérisée par un changement de la tension et une petite variation dans le courant de la courbe I-V ces variations seront plus explicites dans la

courbe P-V ou on voit bien le changement de puissance avec la température qui varie de -25 a 75 °C plus elle diminue plus on a de puissance

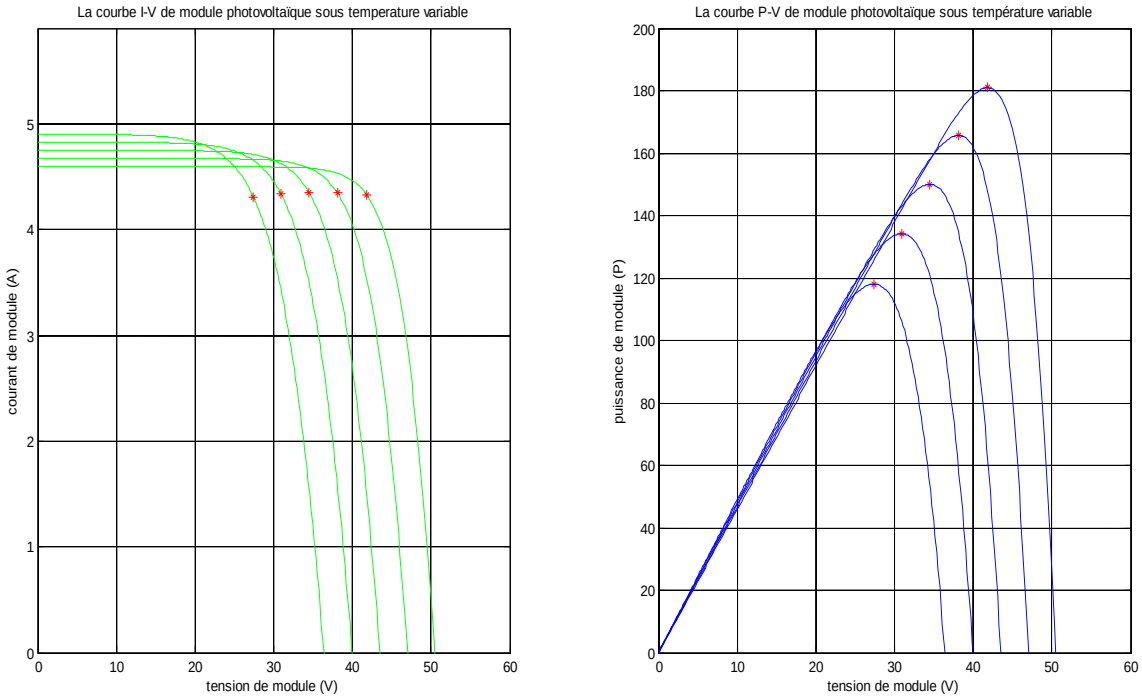


Figure IV.4 *influence de la température sur la courbe I-V et P-V.*

Pour résumer ce qu'on vient de voir les caractéristiques électriques d'un panneau PV dépendent fortement de l'environnement ou elles se situent donc un fort éclairement contribue a un fort courant et une forte température diminue la tension de sortie.

IV.3 Modélisation du hacheur Buck-Boost (DC/DC)

On a choisie le hacheur Buck-Boost car il présente une plus grande polyvalence de fonctionnement que le hacheur Bosst

IV.3.1 Modélisation du hacheur

Également appelé hacheur abaisseur- élévateur ou dévolteur-survolteur, il a la capacité de fournir une tension plus faible ou plus élevée que celle appliquée à son entrée et permet ainsi d'adapter la tension du générateur PV aux besoins de la charge. Cette adaptation est réalisée par variation du rapport cyclique α. Il est représenté par la figure IV.5.

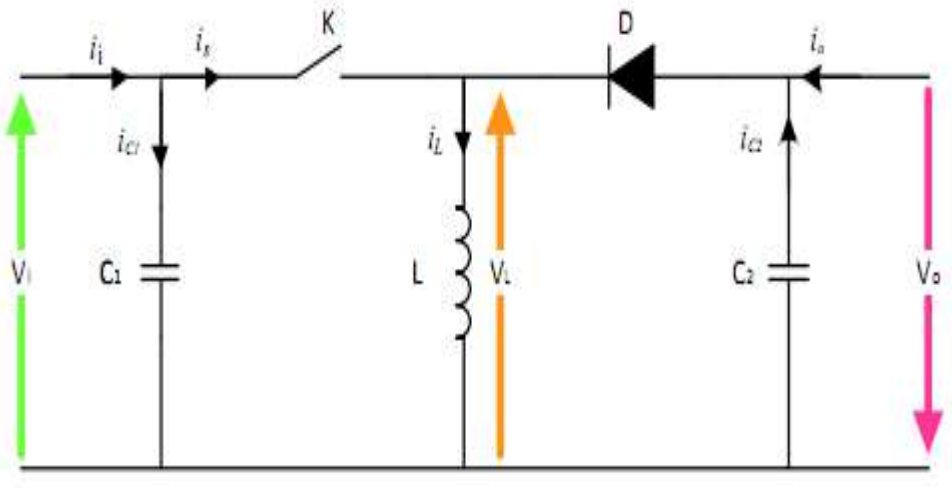


Figure IV. 5 *Hacheur Buck-Boost [22]*

L'entrée et la sortie du hacheur représentent des sources de tension. Un convertisseur direct ne peut mettre en relation deux sources de même nature, une telle représentation est justifiée dans le sens où le convertisseur comporte une source de courant qui relie les deux sources de tension, et c'est les capacités à l'entrée et à la sortie du convertisseur qui confèrent le caractère source de tension alors que l'inductance confère le caractère source de courant.

L'élément de commande (transistor, thyristor, MOS, IGB, etc…) est représenté par l'interrupteur K.

On distingue deux modes de fonctionnement, le premier est caractérisé par la conduction de l'élément de commande : la tension d'entrée est directement appliquée à l'inductance et le courant de cette dernière augmente linéairement et c'est la capacité à la sortie du convertisseur qui alimente la charge. Durant le second mode de fonctionnement, lorsque l'élément de commande est bloqué, la tension à travers l'inductance se polarise en inverse ce qui engendre la conduction de la diode, ainsi, l'énergie stockée par la bobine va alimenter la charge et recharger la capacité.

Durant le fonctionnement du hacheur, l'interrupteur K est fermé pendant un temps t_{on} égal à αTs et ouvert pendant un temps toff égal à $(1-\alpha)Ts$.

Avec:

T_s période de commutation égale $1/f_s$

f_s fréquence de hachage

α rapport cyclique de commande ($\alpha \in [0,1]$)

Le principe de fonctionnement du hacheur Buck-Boost est basé essentiellement sur la position du commutateur K :

- Intervalle [0, αTs] : Cet intervalle est caractérisé par la conduction de l'élément de commande :

la tension d'entrée est directement appliquée à l'inductance et le courant de cette dernière augmente linéairement avec une pente égale à Vi/L ce qui lui permet de stocker de l'énergie durant toute la durée de la fermeture, et c'est la capacité à la sortie du convertisseur qui alimente la charge [23]. Le circuit est le suivant:

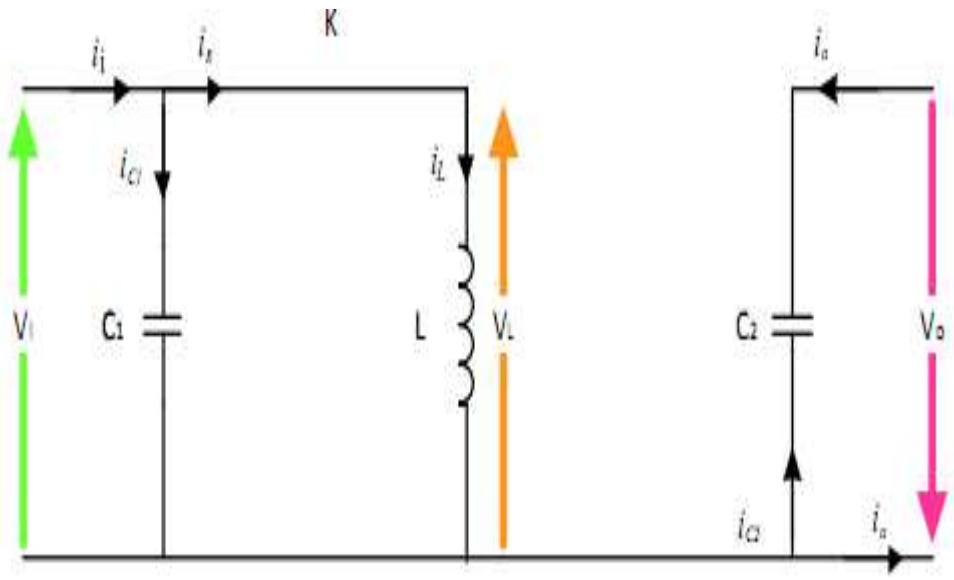


Figure IV. 6 *Premier mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST [23]*

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \dfrac{dv_1(t)}{dt} = i_1(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \dfrac{dv_\circ(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = L \dfrac{di_L(t)}{dt} = v_1(t) \end{cases} \quad \text{(IV-6)}$$

-Intervalle [αTs,Ts] : l'élément de commande est bloqué, la tension à travers l'inductance se polarise en inverse ce qui engendre la conduction de la diode, ainsi, le courant de la bobine décroît linéairement avec une pente de – V_o/L ce qui permet d'alimenter la charge et de recharger la capacité. Le circuit est représenté par la figure ci-dessous.

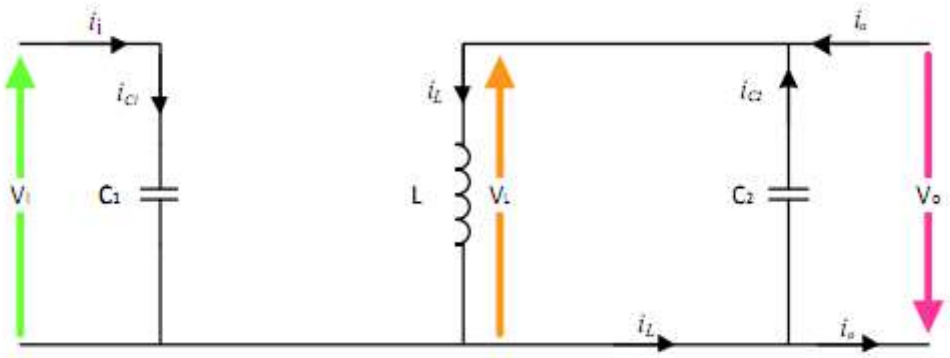


Figure IV. 7 *Second mode de conduction du hacheur BUCK-BOOST*

Le modèle d'équation dans cette configuration est le suivant :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = c_1 \dfrac{dv_1(t)}{dt} = i_1(t) \\ i_{c_2}(t) = c_2 \dfrac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \dfrac{di_L(t)}{dt} = -v_0(t) \end{cases} \quad \text{(IV-7)}$$

En combinant les deux systèmes d'équation II.6 et II.7, on trouve le modèle approximé du hacheur Buck-Boost [16]

$$\begin{cases} c_1 \dfrac{dv_1(t)}{dt} T_s = \alpha T_s (i_1(t) - i_L(t)) + (1-\alpha) T_s i_1(t) \\ c_2 \dfrac{dv_\circ(t)}{dt} T_s = \alpha T_s i_\circ(t) + (1-\alpha) T_s (i_L(t) - \mathrm{i}_\circ(t)) \\ L \dfrac{di_L(t)}{dt} T_s = \alpha T_s \, \mathrm{V}_1(t) - (1-\alpha) T_s v_\circ(t) \end{cases} \quad \text{(IV-8)}$$

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système devient :

$$\begin{cases} I_1 - \alpha I_L = 0 \\ (1-\alpha) I_L - I_0 = 0 \\ \alpha V_1 - (1-\alpha) V_0 = 0 \end{cases} \quad \text{(IV-9)}$$

On peut ainsi tirer le rapport de conversion, qui représente le rapport de la tension de sortie sur la tension d'entrée :

$$M(\alpha) = \frac{v_0}{v_1} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \text{(IV-10)}$$

Grâce à cette dernière expression, on peut déterminer les modes de fonctionnement du hacheur BUCK-BOOST

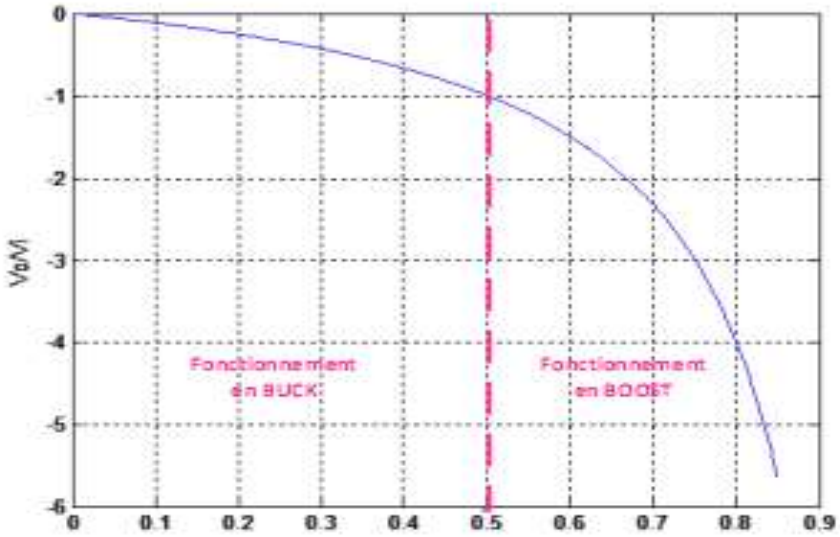


Figure IV. 8 *Zones de fonctionnement du hacheur BUCK-BOOST.*

IV.3.2 Dimensionnement des composants

Pour pouvoir dimensionner les éléments du hacheur nous devons trouver les expressions qui permettent de diminuer l'ondulation. La pente du courant traversant la bobine et la tension aux bornes des capacités pendant la première période de fonctionnement sont données par :

$$\begin{cases} \dfrac{dv_{C_1}}{dt} = \dfrac{I_{c_1}}{C_1} = \dfrac{I_i - I_L}{C_1} \\ \dfrac{dv_{C2}}{dt} = \dfrac{I_{C_2}}{C_2} = -\dfrac{I_0}{C_2} \\ \dfrac{di_L}{dt} = \dfrac{v_i}{L} = -\dfrac{V_i}{L} \end{cases} \quad \text{(IV-11)}$$

Les valeurs crête à crête des courants et des tensions sont :

$$\begin{cases} v_{1_{cc}} = 2\Delta v_1 = \dfrac{I_i - I_L}{c_1}\alpha T_d \\ v_{0_{cc}} = 2\Delta v_0 = -\dfrac{I_0}{c_2}\alpha T_d \\ I_{L_{cc}} = 2\Delta i_L = \dfrac{v_i}{L}\alpha T_d \end{cases} \quad \text{(IV-12)}$$

On peut déduire les valeurs des composants à choisir pour des ondulations données:

$$\begin{cases} c_1 = -\dfrac{I_i - I_L}{2\Delta v_0}\alpha T_d \\ c_2 = \dfrac{I_0}{2\Delta v_0}\alpha T_d \\ L = \dfrac{v_i}{2\Delta i_L}\alpha T_d \end{cases} \quad \text{(IV-13)}$$

IV.3.3 Commande du hacheur

Du fait du non linéarité de la caractéristique I-V du panneau photovoltaïque pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet de piloter le hacheur, reliant le panneau PV à la charge de manière à fournir en temps réel le maximum de puissance.

Dans notre étude, nous allons nous intéresser à l'algorithme P&O pour sa simplicité et sa rapidité. Son principe est représenté dans la figure ci-dessous

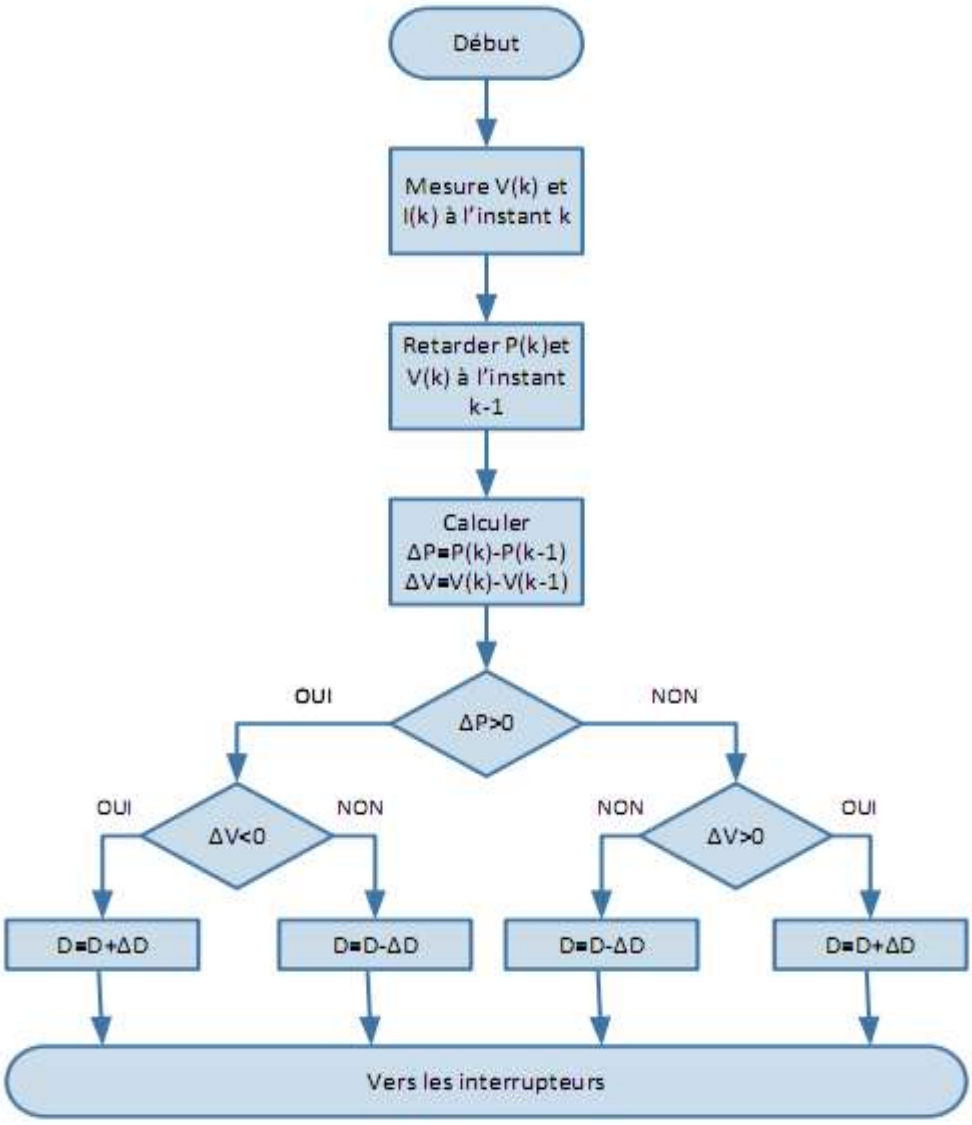


Figure IV. 9 *Algorithme P&O.[16]*

Cet algorithme consiste à perturber le fonctionnement du système en modifiant la tension aux bornes du champ de modules PV et à analyser la variation de puissance qui

en résulte. Ainsi on peut déduire qu'une incrémentation positive de la tension peut engendrer :

- Un accroissement de la puissance : cela signifierait que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.
- Une décroissance de la puissance : cela signifierait que le point de fonctionnement se trouve à droite du PPM

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

À partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de la tension sur la caractéristique P=f(V), il devient facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de le faire converger vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande appropriée.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

Cette méthode est utilisée pour sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques inconvénients liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi, car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

IV.3.4 Résultats de la simulation

Pour notre programme on a directement lié l'algorithme de l'MPPT avec celui du hacheur et on a ajouté un autre programme qui va définir le premier point de fonctionnement qui sera le point idéale MPP de ce fait notre programme ne fera que simulé le comportement d'un hacheur avec MPPT, notre programme utilise la tension et non pas le rapport cyclique et en supposons que notre convertisseur est un convertisseur idéale les équation précédente n'intervienne que dans la valeur du courant, et ce dernier ne dépend pas de la charge car on supposera que toute l'énergie produite sera consommée par le réseau.

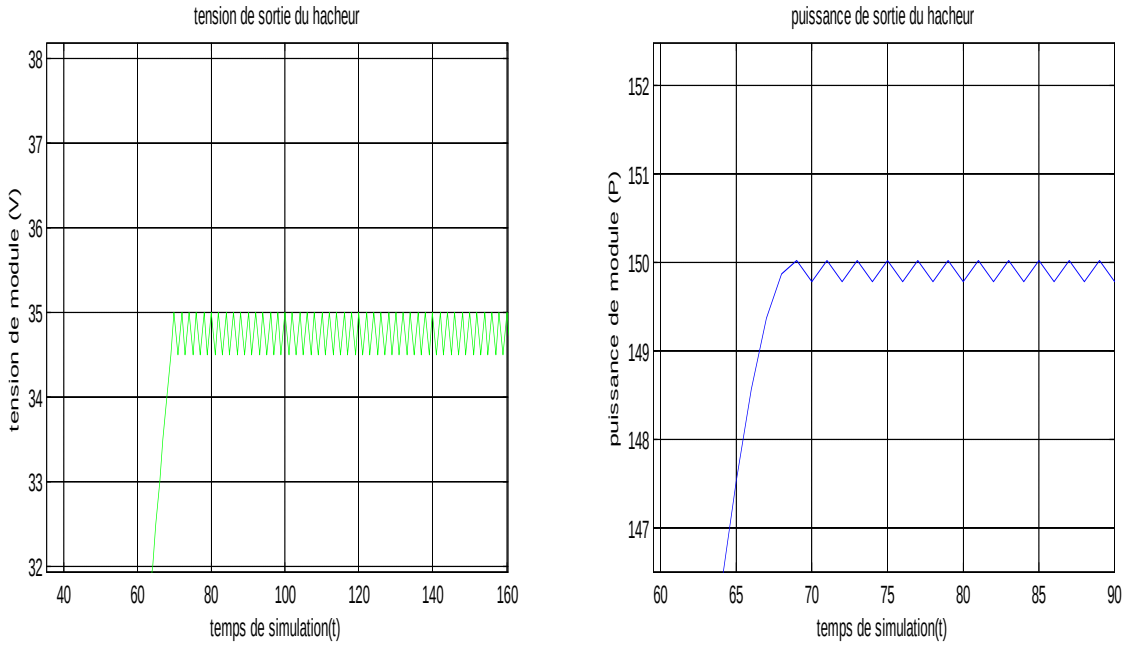


Figure IV. 10 *Puissance et tension obtenue avec MPPT.*

On voit bien dans les deux graphes de puissance et de tension l'inconvénient de l'MPPT car ce dernier certes tend à fournir le maximum de puissance mais cela génère des oscillations autour d'un point de fonctionnement et cela en utilisant la P&O.

IV.4 Modélisation de l'onduleur a deux niveaux [24]

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs de l'électronique de puissance, La forte évolution de ces convertisseurs s'est appuyée d'une part, sur le développement des composants à semi-conducteurs et d'autre part sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques de largeur d'impulsion**.**

IV.4.1 Structure de l'onduleur a deux niveaux

La structure de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est composée de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuit de la source de tension continue à l'entrée de l'onduleur, les interrupteurs T1 et T1', T2 et T2', T3 et T′3 doivent être contrôlés de manière complémentaire. Chaque interrupteur est monté en parallèle inverse avec une diode de récupération montée en tête-bêche avec le semi-conducteur.

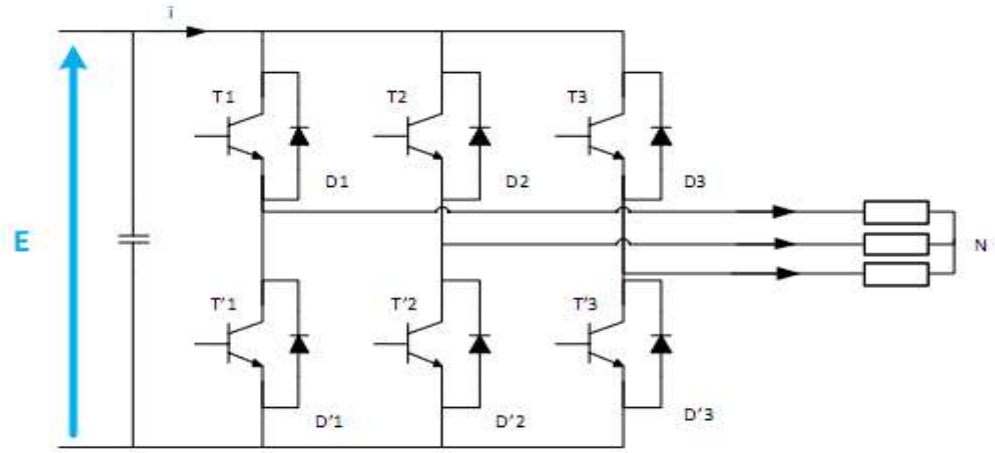


Figure IV. 11 *Structure de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux.(24)*

Pour simplifier l'étude et la complexité de la structure de l'onduleur, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée;
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable;
- La charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

Les diodes D=1,2, ... 6, sont des diodes de protection des transistors assurant la roue libre ou la récupération.

En considérant que chaque paire (transistor, diode) constitue un seul interrupteur on a le schéma simplifié suivant:

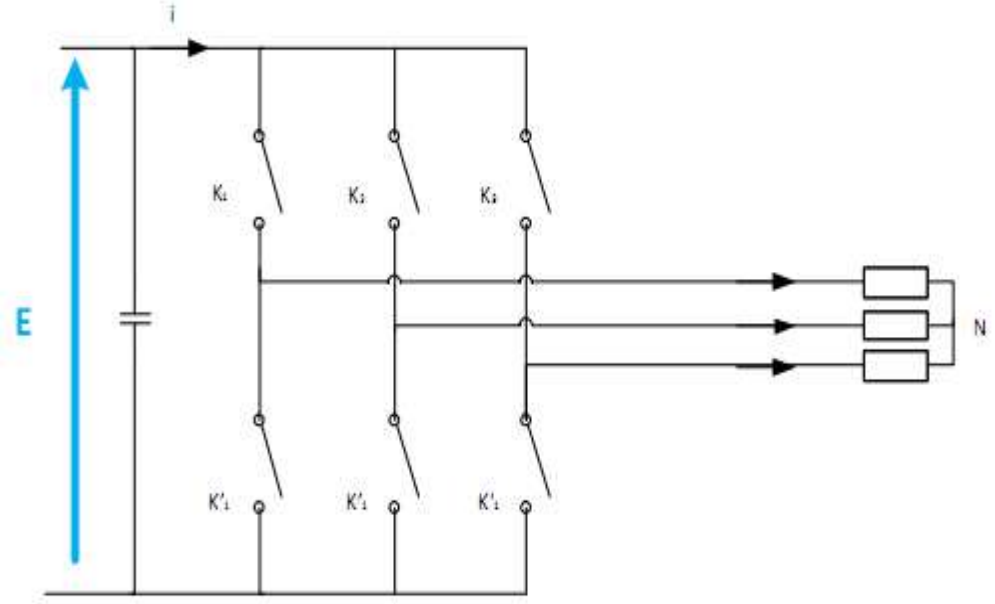


Figure IV. 12 *Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux simplifiée.(24)*

Les états des interrupteurs, supposés parfaits, sont représentés en théorie par trois fonctions logiques K_k (k= A, B, C) telles que :

- K_k= 1 : l'interrupteur du haut est fermé et par conséquent celui du bas est ouvert.

- K_k= 0 : l'interrupteur du haut est ouvert et par conséquent celui du bas est fermé.

La relation entre le vecteur $[K_A K_B K_C]^t$ et le vecteur des tensions lignes $[U_{AB} U_{BC} U_{CA}]^t$ est donnée par :

$$\begin{bmatrix} UAB \\ UBC \\ UCA \end{bmatrix} = E. \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} . \begin{bmatrix} k_A \\ k_B \\ k_C \end{bmatrix} \quad \text{(IV-14)}$$

Si on considère que les tensions sont équilibrées, on peut déduire les expressions des tensions simples par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} v_A = \dfrac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ v_B = \dfrac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ v_C = \dfrac{U_{AC} - U_{BA}}{3} \end{cases} \quad \text{(IV-15)}$$

À partir des relations (III.14) et (III.15) on obtient l'expression des tensions simples en fonction de l'état des interrupteurs comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = 1/3 . E . \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad \text{(IV-16)}$$

IV.4.2 Commande de l'onduleur

Les onduleurs délivrent en général une tension alternative formée de créneaux rectangulaires.

C'est ce problème qui explique l'évolution importante que viennent de connaitre les onduleurs. L'une d'elles consiste à utiliser la commande MLI.

Dans ce projet, on utilisera la modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdale pour la commande de l'onduleur à deux niveaux. La modulation de largeur d'impulsion est une méthode qui permet à la fois la variation de l'amplitude du fondamental de la tension et le contrôle de son contenu harmonique. Cette méthode consiste à comparer l'amplitude de la modulante (tension de référence de l'onduleur) et des commutations supplémentaires à fréquence élevée introduites sous forme d'un signal en dent de scie appelé porteuse [25].

IV.4.3 Résultat de simulation



Figure IV.13 *Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoïdale*

Commande de l'interrupteur

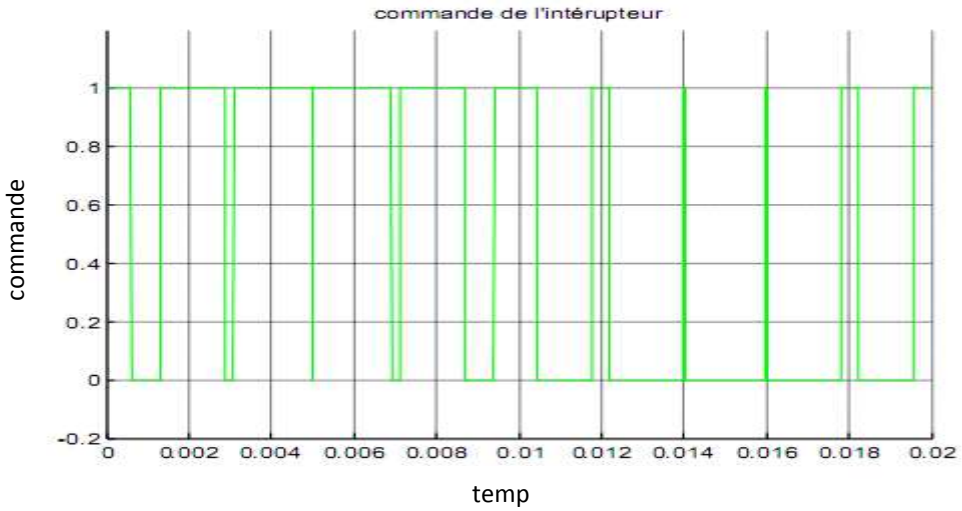


Figure IV. 14 *signale de commande d'un interrupteur commandé par MLI.*

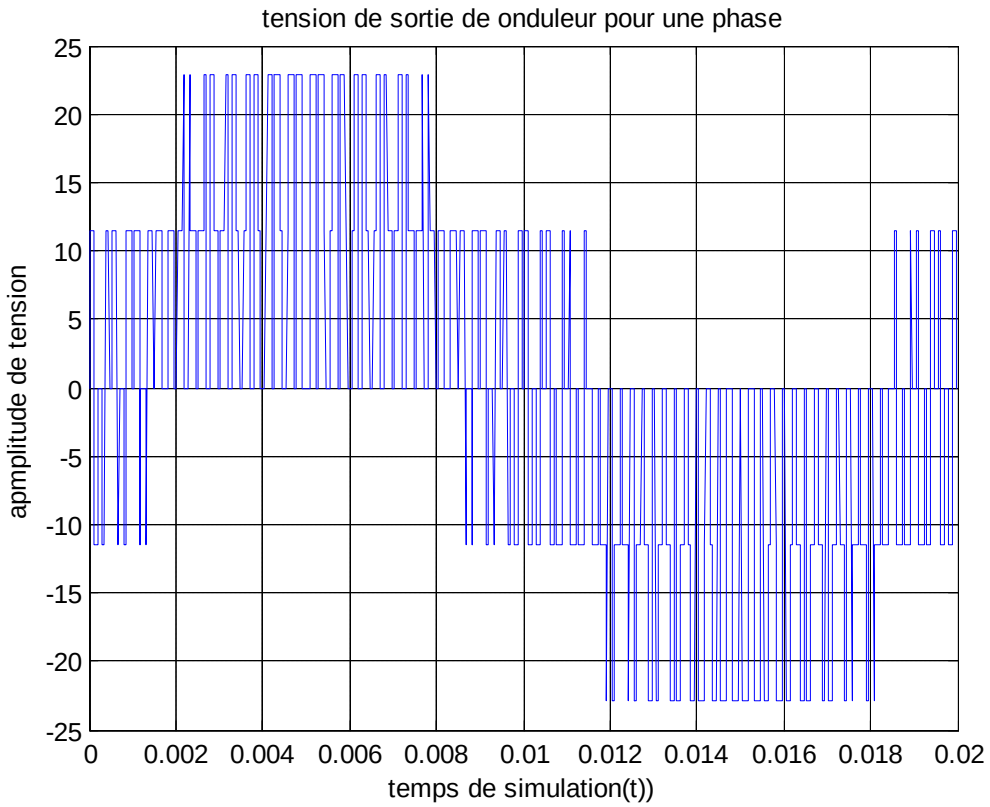


Figure IV.15 *tension de sortie de l'onduleur pour une phase*

La tension de sortie est une suite de créneaux d'amplitude fixe et de largeur variable.

La MLI présente deux avantages importants :

- Repousser vers les fréquences les plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage
- Faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents constituants d'une chaîne de production photovoltaïque, qui ont été choisis afin de tenir compte des interactions pouvant subvenir à différents niveaux.

On a choisi un modèle mathématique des panneaux PV qui tient compte de la variation d'ensoleillement ainsi que la température, et dont les résultats de simulation prouvent la précision.

Nous avons ensuite modélisé les convertisseurs en optant pour des modèles régissant leurs fonctionnements et cela sous certaines hypothèses simplificatrices justifiées.

En outre, en considérant la tension des panneaux constante et égale à la tension optimale, nous avons supposé qu'ils fonctionnaient dans des conditions idéales grâce à un algorithme de recherche de puissance maximum (MPPT pour Maximum Power Point Tracking) appliqué au fonctionnement d'un hacheur Buck-Boost qui permet d'avoir différents niveaux de tension à la sortie de l'étage d'adaptation.

Une simulation d'un onduleur de tension à deux niveaux commandé par une commande à modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdale et une porteuse a été faite, en considérant une tension fixe à son entrée on a eu une tension triphasé sinusoïdale à la sortie qui correspond au fonctionnement réelle de ce dernier.

V.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque représente une source d'énergie formidable mais son utilisation reste très sporadique, différentes études pour son intégration dans un réseau de distribution sont en cour mais l'intermittence de cette énergie la rend plus problématique, pour l'intégration de cette dernière au réseau différent critères sont pris en considération mais comme notre travaille se limitera au régime statique, l'influence sur le réseau sera limitée à la puissance perdue, et au profile de tension. Pour faire cette étude nous allons combiner les différents composants vue dans le chapitre précédant pour formé notre chaine PV, afin d'obtenir une puissance et une tension donnée, les différentes données d'entré pourront être choisi par l'utilisateur pour permettre une meilleur appréhension des résultats et leur impacte sur les différents modèles de réseau de distribution Nous définirons le nœud d'intégration optimale pour chaque réseau de distribution en comparent les différents points d'intégration possible et cela suivant deux critères une fois avec la puissance perdue et une fois avec le profile de tension.

V.2 Configuration de la chaine PV

On a différente configuration pour la production PV cela dépend du type de système voulue par exemple si c'est une installation autonome ou relié au réseau, hybridé ou non, pour notre étude on verra une chaine de production relié au réseau de distribution la chaine se compose de :

- Un générateur photovoltaïque composé d'un nombre défini de panneau série parallèle
- Un hacheur BUCK-BOOST commandé par une MPPT type P&O
- Un onduleur a deux niveaux commandé par une MLI

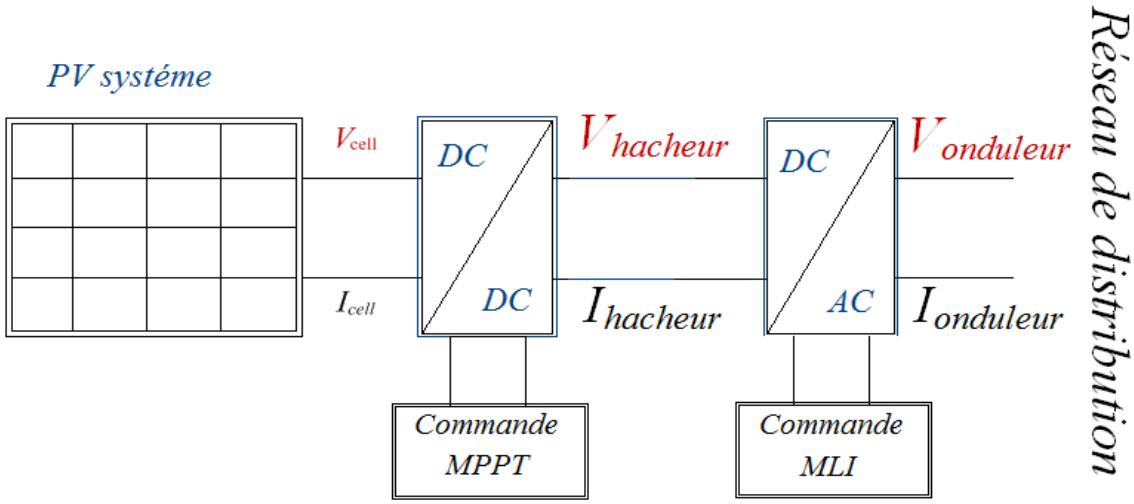


Figure V.1 ***Configuration d'une chaine de production PV.(25)***

V.2.1 Simulation et résultats

Lors de la simulation de chaine de production on choisi les différentes valeurs d'entrée du système à savoir

- L'éclairement 1000W/m²
- La température 25°C
- La résistance série 0.0051Ω
- Le nombre de panneau série 15
- Le nombre de panneau parallèle 1
- La fréquence de l'onduleur 50Hz
- La modulation 40

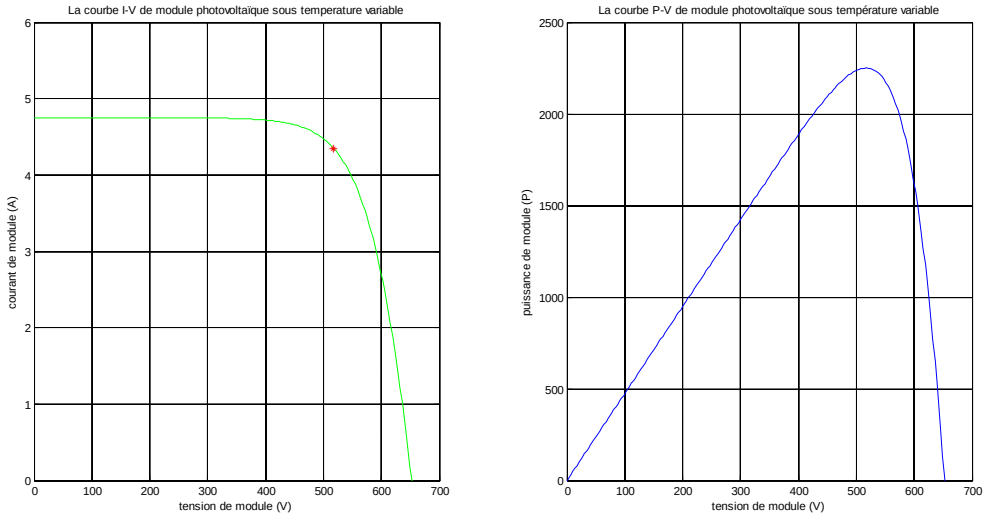


Figure V.2 *Courbe I-V et P-V du générateur photovoltaïque.*

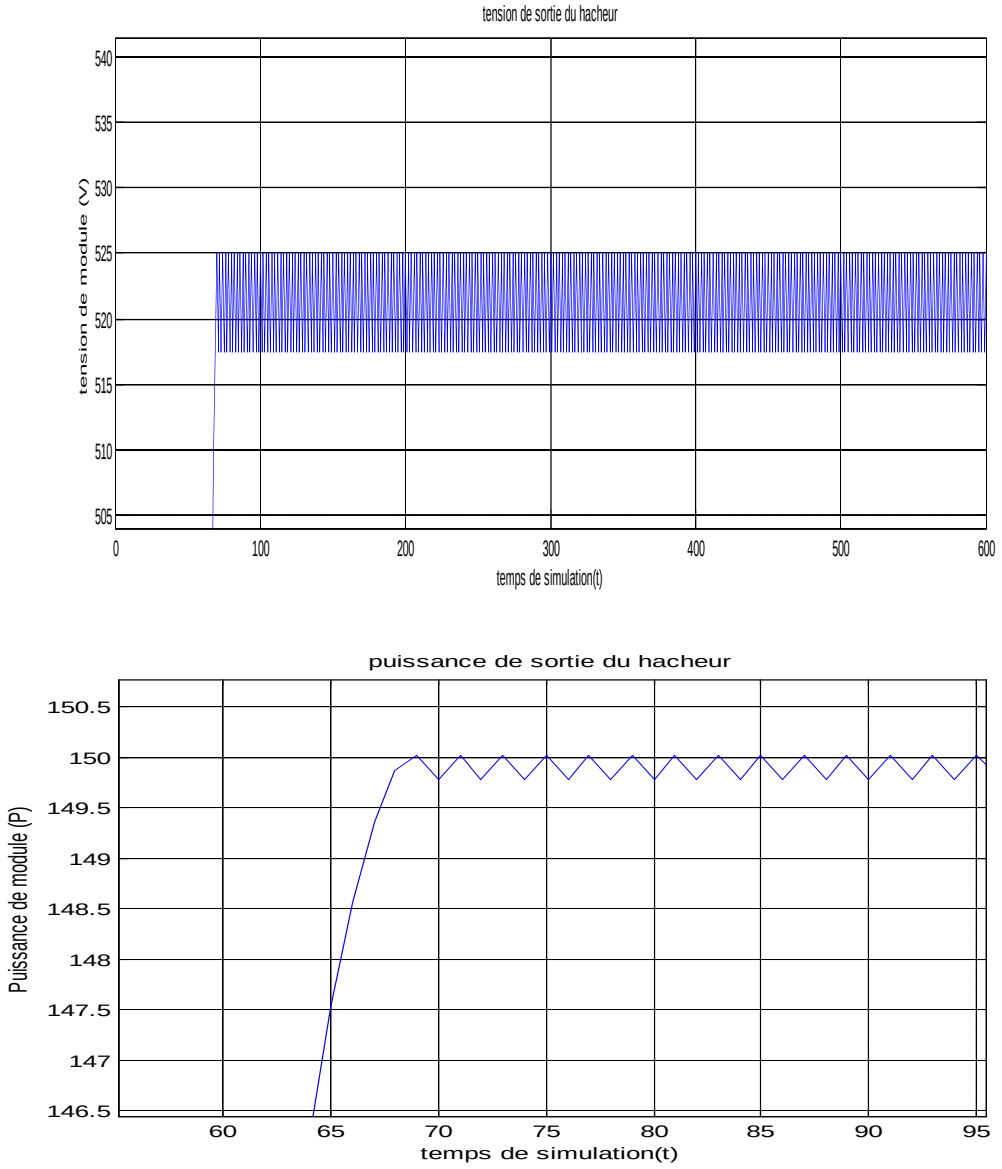


Figure V.3 *Courbe respective de la tension et de la puissance de sortie du hacheur.*

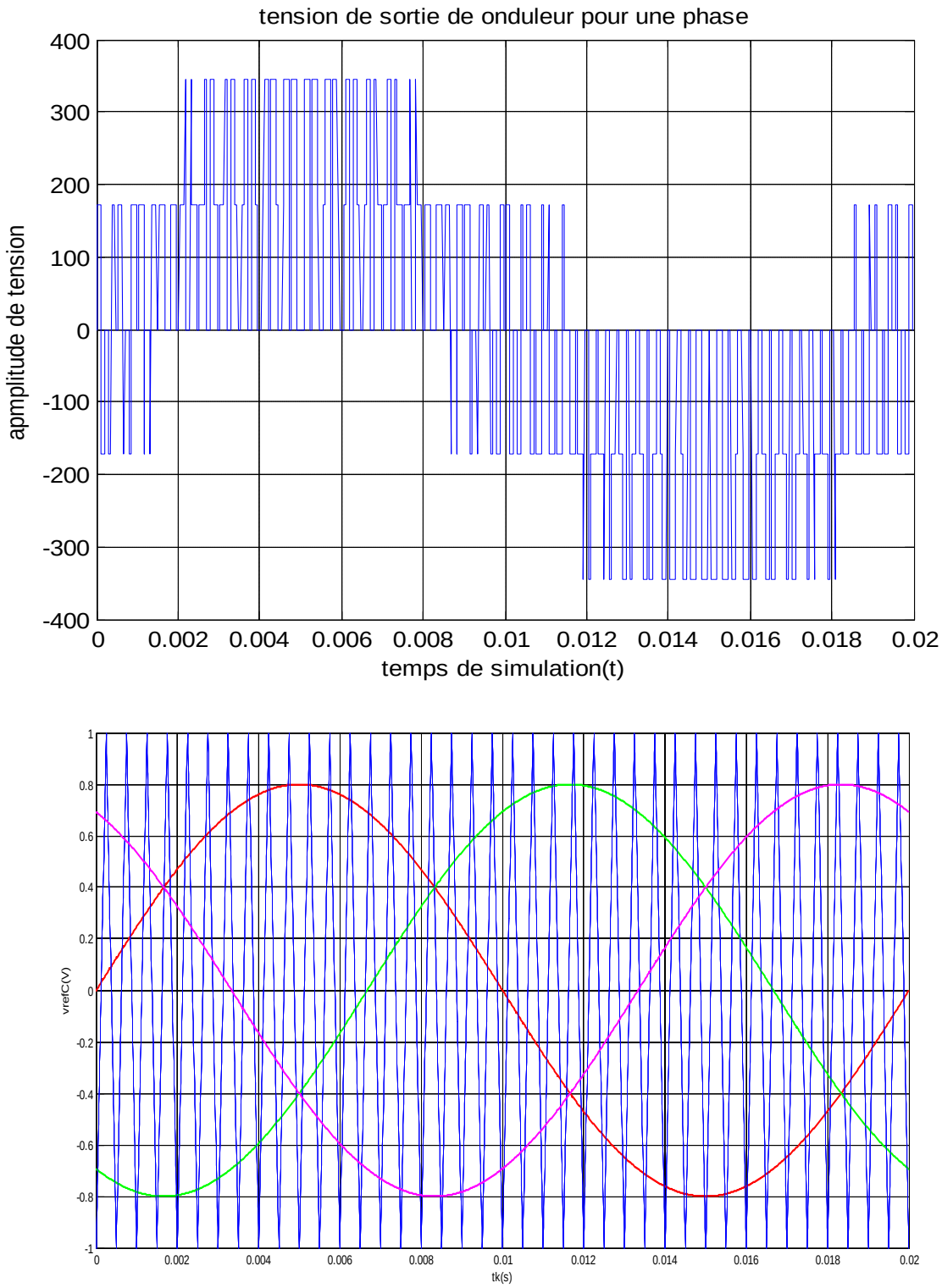


Figure V.4 *signale de sortie d'une phase de l'onduleur et la MLI.*

Donc à la fin de notre chaine de production nous obtenons différents résultats le premier est la tension et la puissance de sortie de notre générateur photovoltaïque cette puissance est optimisée par le hacheur commandé par la P&O.

Le second résultat est la tension et la puissance de sortie du hacheur ses derniers sont caractérisés par un démarrage au point zéro et une oscillation autour d'un point optimale de fonctionnement et cela en raison de l'utilisation de la P&O.

Le troisième résultat est la tension alternée à la sortie de l'onduleur avec la MLI qui génère la commande de l'onduleur

A noté que les pertes au niveau de toute la chaine de production ont été négligées

V.3 Intégration de la chaine PV a un réseau de distribution

L'intégration de notre chaine de production ce fera à travers un simple écoulement de puissance et étant donné que notre système est supposé sans perte on injecte directement la puissance de sortie du générateur photovoltaïque dans le réseau souhaité.

Lors de l'écoulement de puissance nous essaierons de définir le meilleur point d'intégration et cela en suivant deux critères le profile de tension et la puissance perdu du système. En premier lieu nous commencerons par une analyse des résultats d'intégration du PV à chaque nœud d'injection ensuite nous comparerons les différents résultats en choisissant ainsi le nœud qui présente le moins de perte de puissance et celui avec le meilleur profile de tension.

V.3.1 Intégration dans un réseau 16 nœud

Pour notre première intégration nous avons choisie un réseau 16 nœuds d'ont le profile de tension et les pertes en puissance sont visualisés dans la figure V.5.

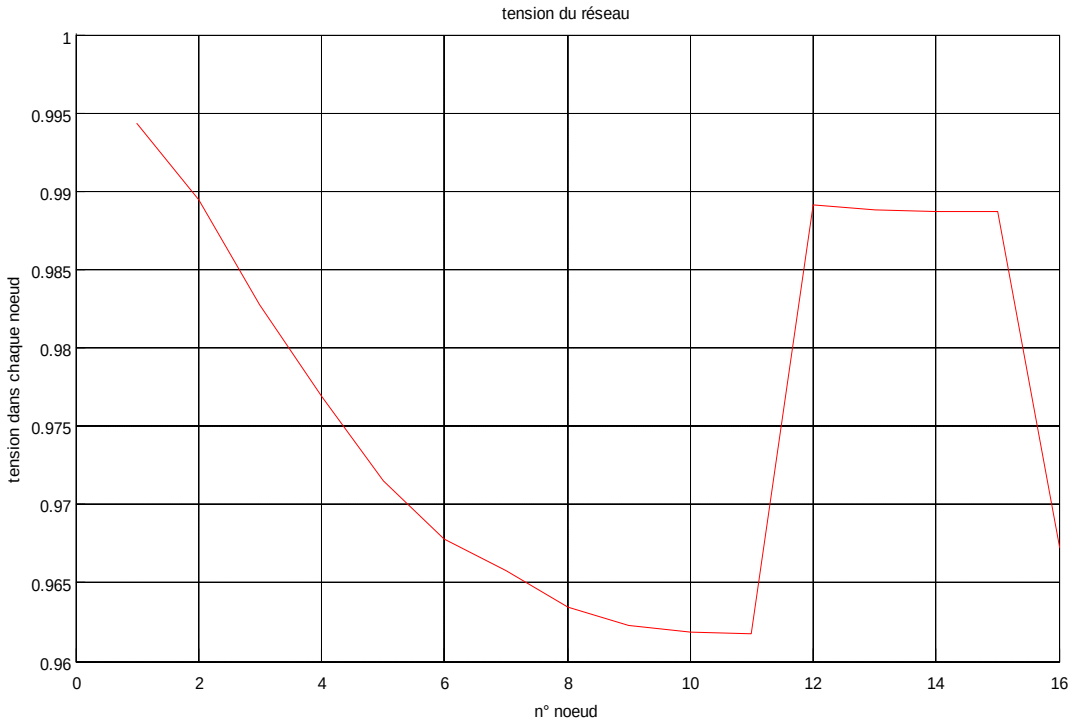


Figure V.5 *Profile de tension du réseau 16 nœuds avant injection du PV*

N'ayant pas de point de comparaison pour interpréter ces résultats nous passons directement à l'ingestion du PV dans le réseau 16 nœuds notre programme va directement définir les deux nœuds optimaux pour notre système.

Pour les mêmes données d'entrée précédente du générateur PV et une puissance de 22 kw on a le tableau si dessous :

Nœud SE(i)	0	2	4	5	6	6
Nœud RE(i)	1	3	5	6	7	15
Vmax (pu)	0.9946	0.9944	0.9944	0.9944	0.9944	0.9944
Vmin (pu)	0.9441	0.9439	0.9439	0.9439	0.9439	0.9439
Les pertes de P	210.9674	206.2675	203.8403	201.9985	199.1521	212.8205
Les pertes de Q	61.7154	61.3693	61.0201	62.5515	60.48345	60.4448

Tableau V-1 *les différents points d'intégration du générateur PV avec la tension min et max et les pertes de puissance du réseau dans chaque noeud d'injection.*

On voit bien que le noeud 7 est le noeud qui génère le moins de perte de puissance dans le réseau et qui a le meilleur profile de tension on voit aussi l'influence du générateur PV sur le niveau de perte et du profile de tension.

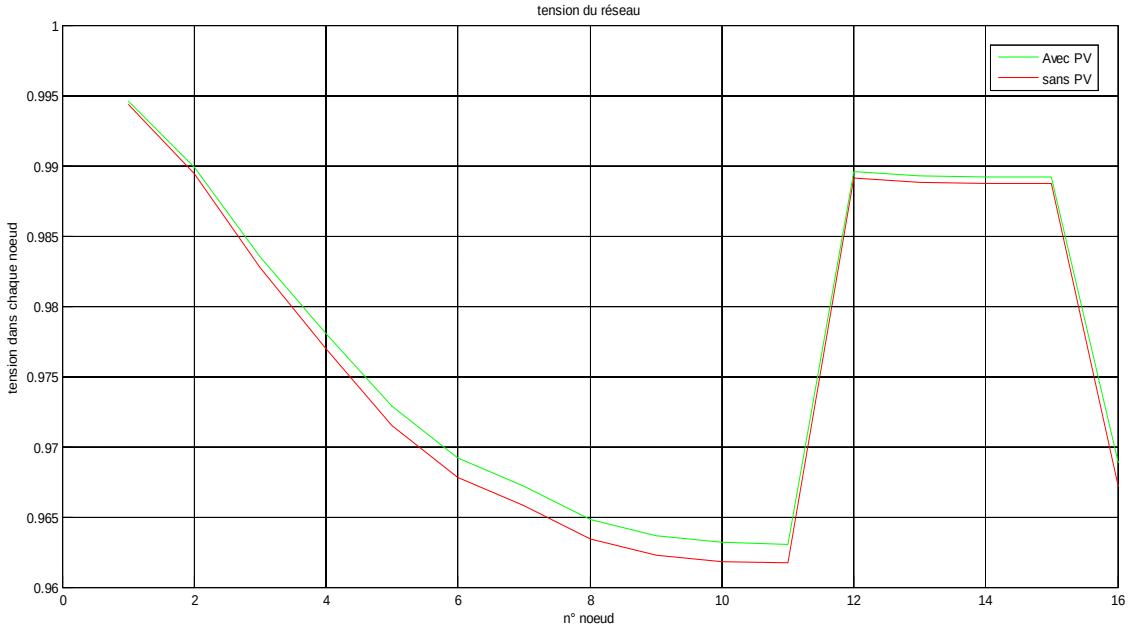


Figure V.6 *Profile de la tension 16 nœuds avant et après intégration du PV.*

V.3.2 Intégration dans un réseau 34 nœud

Pour notre deuxième intégration nous avons choisi un réseau 34 nœuds d'ont le profile de tension et les pertes en puissance sont visualisés dans la figure V.7.

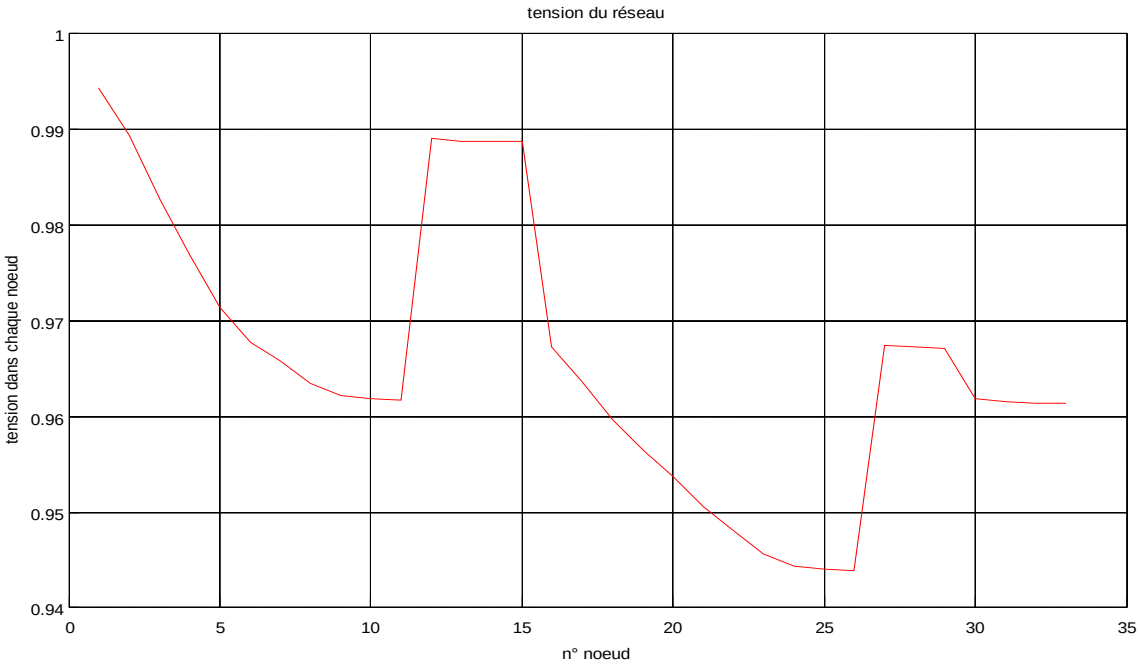


Figure V.7 *Profile de tension du réseau 34 nœuds avant injection du PV.*

Etant donné que l'ordre de grandeur des puissances est différent pour ce réseau on double la puissance de notre générateur a 44kw près injection du PV dans notre réseau 34 nœud on obtient les résultats dans le tableau ci dessous :

Nœud SE (i)	1	4	5	8
Nœud RE (i)	2	5	6	9
Vmax (pu)	0.9946	0.9946	0.9944	0.9944
Vmin (pu)	0.9439	0.9439	0.9439	0.9439
Les pertes de P	213.0887	213.0134	212.9905	212.9719
Les pertes de Q	62.1447	61.0201	62.5515	60.3962

Tableau V-2 *différents points d'intégration du générateur PV avec la tension min et max et les pertes de puissance du réseau dans chaque noeud d'injection (réseau 34 nœud)*

On voit bien que le nœud 9 est le nœud qui génère le moins de perte de puissance dans le réseau et qui a le meilleur profile de tension on voit aussi l'influence du générateur PV sur le niveau de perte s et du profile de tension.

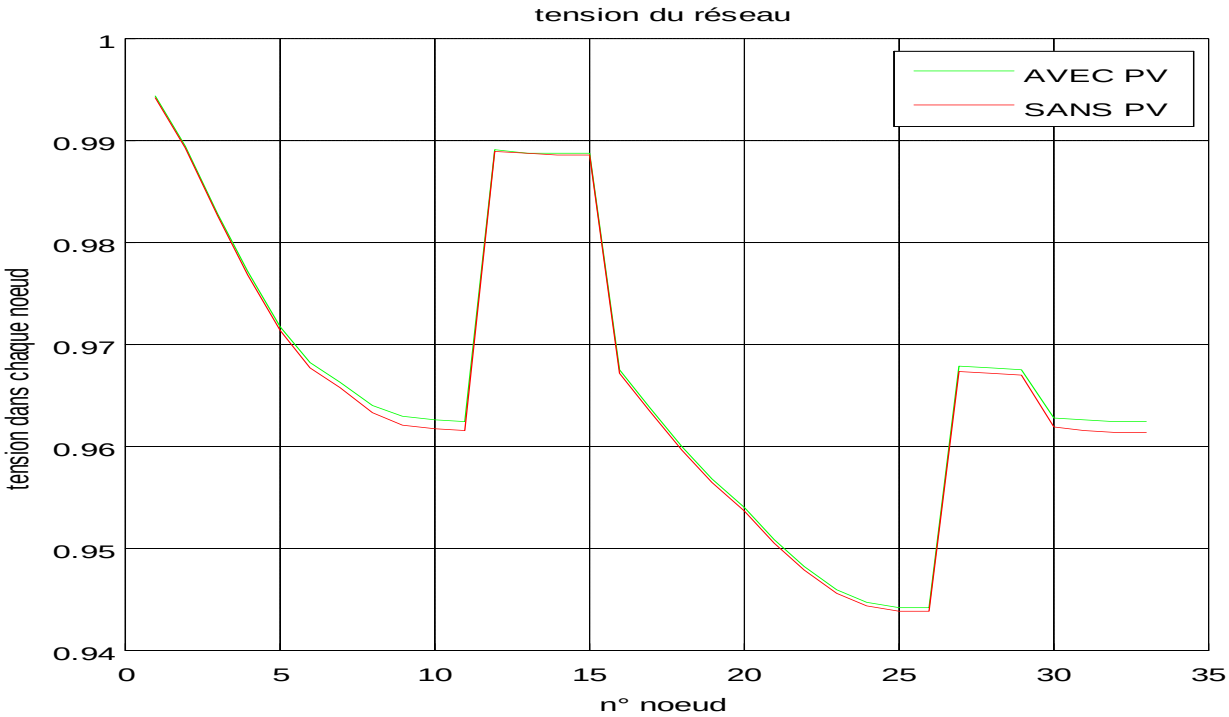


Figure V.8 *profile de la tension 34 nœuds avant et après intégration du PV.*

V.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a compilé tous les sous programmes vu dans le chapitre précédent pour réaliser une simulation d'une chaine de production photovoltaïque, on a laissé une certaine malléabilité dans le programme pour permettre la modification de différentes données comme l'éclairement ou le nombre de panneau série-parallèle cela a pour but de voir le comportement de la chaine de production sous différentes conditions et son impact lors de son injection dans un réseau.

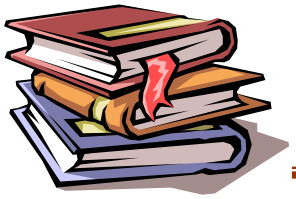
Les différents résultats obtenus permettent d'avoir une idée de l'influence d'un générateur PV sur différents types de réseau électrique et l'influence des conditions externes sur ce dernier on voit ca notamment lors d'un changement d'éclairement ou de température on a noté aussi que les différents composants de notre chaine de production généraient des tensions et des oscillante autour d'un point de fonctionnement et doivent être filtrés pour correspondre aux critères d'intégration au réseau électrique.

Dans ce mémoire intitulé: “l’impacte de l’intégration de la chaine photovoltaïque au réseau distribution”, nous avons abordé la question de l’insertion de la production distribuée dans les réseaux électriques de distribution.

Les travaux menés pendant cette thèse ont analyser l’impact de la puissance l’intégration de la chaine photovoltaïque obtenue sur un réseau de distribution.et donnée la proposition des solutions pour le problème de tension sur les réseaux de distribution, lié à la connexion de productions sur celui-ci Ainsi, et

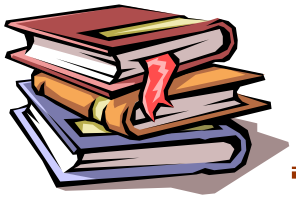
Dans le premier chapitre du mémoire, nous avons exposé les différentes parties du réseau électrique où l’on s’est intéressé a réseau électrique de distribution. On a discuté son rôle, architecture et schéma d’exploitation…etc. Le chapitre II donne les méthodes théoriques de la réglage de tension, Le troisième chapitre, nous avons fait une petite présentation de toutes les technologies qui entrent dans la réalisation d’une chaine de production photovoltaïque. Nous avons notamment parlé du générateur PV, du panneau et de la cellule PV, de leurs caractéristiques physiques et électriques, de l’influence de l’éclairement et de la température, et du montage série-parallèle. Nous avons aussi traité l’étage d’adaptation composé d’un convertisseur (DC/DC-hacheur Boost Buck et Buck-Boos) avec une commande MPPT et le convertisseur (DC/AC-onduleur à deux niveaux) avec sa commande MLI, pour la dernière partie du chapitre, un aperçu sur leur intégration dans les réseaux de distribution est présenté. Le quatrième chapitre traite de la simulation des différents composants cités dans le chapitre précédent. Néanmoins, nous avons a pu confirmer, que le comportement de nos systèmes concordait avec le comportement réel, Le cinquième chapitre a eu pour but d’analyser l’impact de l’injection d’un générateur PV dans le réseau de distribution à travers un programme d’écoulement de puissance et de définir le point d’injection optimale.

Les résultats obtenus montrent que le PV contribue à la diminution des pertes en puissance et améliore le profil de tension.



Bibliographe

[1]	**CEA, Mémento sur l'énergie 2009**,Commissariat à l'Énergie Atomique, Tech. Rep.209.[Online].Available : http://www.cea.fr/content/download/23534/379632/le/ ceamemento sur l'energie_2009.pdf
[2]	**J.C. Sabonnadière and N. Hadjsaïd**, Lignes et réseaux électriques 3 : fonctionnement dans le cadre de la libéralisation des marchés, B. Multon, Ed. Lavoisier, 2008, vol. 3
[3]	Rapport d'Activité de secteur d'énergie (ministère de l'Energie et les mines)
[4]	**P.CARRIVE**. (Structure et planification, réseau de distribution. Technique de l'ingénieur), traité de l'électricité 1990.
[5]	**B. RAISON M. CRAPPE**, (Intégration de la production décentralisée dans les réseaux électriques). Cours pour une formation destinée à l'ADEME. Service d'électrotechnique, Faculté polytechnique de Mons, 5/7/2001.
[6]	**OLIVIER RICHARDOT**. (Réglage coordonné de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisée). Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de GRENOBLE. 2006
[7]	**YANN PANKOW**. (Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque). Thèse de doctorat. Université des sciences et technologie de LILLE. 2004
[8]	Mémento de la sûreté du système électrique", édition 2004 http://www.rte7france.com/htm/fr/mediatheque/vie_publi_annu_memento.jsp
[9]	**P.Bornard, M.Pavard,** "Réseaux d'inter connexion et de transport : réglage Et fonctionnement", Techniques de l'Ingénieur, traitéGénieElectriqueD4 090,1993
[10]	**H.Lefebvre, D.Fragnier, J.7Y.Boussion, P.Mallet, M.Bulot**,"Secondary Coordinatedvoltagecontrolsystem: feedbackofEDF", IEEEPES SummerMeeting, Vol.1, Seattle, Washington, USA, 2000.
[11]	**R.Caire**, "Gestion de la production décentralisée dans les réseaux de distribution», Thèse de doctorat INPG,2004.
[12]	**H.Abbas,R. Starker**,"ThePareto differential evolution algorithm", InternationalJournalonArtificialIntelligenceTools,Vol.11,N°4,2002.



Bibliographe

[13]	**V. Barichard**,"Approche hybride pour les problèmes multi objectifs", Thèse de doctorat de l'Université d'Angers,2003
[14]	**D.Popovic, M.Calovic, V.Levi**,"Voltagereactivesecurityanalysisin Powersystemswithautomaticsecondaryvoltagecontrol", IEEproceedings– Generation, TransmissionandDistribution, Vol.141, No.3,1994.
[15]	article la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire [daniel lincon 2007]
[16]	**PFE analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking** (mppt) methods for a solar powered vehicle [Portland state university 1999] Hanne Knopf
[17]	**PFE** étude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne [2010] bouharchouche
[18]	**livre les convertisseurs photovoltaïques** [ludovic protin 2012]
[19]	livre cellules solaires les bases de l'énergie photovoltaïque
[20]	**thèse doctorat** nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques [2009 Paul Sabatier]
[21]	**PFE** comparaison et synthèse d'un nouvel algorithme MPPT robuste pour une chaîne de production d'énergie photovoltaïque [2011 talbi Saïd]
[22]	**These study of maximum power point tracking** (MPPT) techniques in a solar photovoltaic array [Arjav Harjai]
[23]	Article application of circuit model for photovoltaic energy conversion system [Pandiarajan]
[24]	These simulation and implementation of two level and three-level inverters by MATLAB and rt-lab [2011 ABD ALMULA G. M. GEBREEL]
[25]	Thèse commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC [2009 Rafika DRARENI]