

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE  
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



MEMOIRE

*Présenté pour obtenir le diplôme de Magister  
En Electrotechnique*

OPTION

*Modélisation et Commande des Machines Electriques*

TITRE

ETUDE DES VARIATIONS RAPIDES DE TENSION POUR LE  
RACCORDEMENT D'UNE PRODUCTION DECENTRALISEE  
DANS UN RESEAU MT

*Présenté par :*

*KOUADRA Foued*

**Devant le jury :**

Président	: Mr. BENALLA Hocine	professeur	Université Mentouri Constantine
Rapporteur	: Mr. BOUZID Aissa	professeur	Université Mentouri Constantine
Examineur	: Mr. LABED Djamel	M.C.A	Université Mentouri Constantine
Examineur	: Mr. CHENNI Rachid	M.C.A	Université Mentouri Constantine

## REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, je remercie dieu tout puissant de m'avoir donné le courage et la force pour réaliser ce mémoire.*

*Egalement, j'exprime mes plus profonds remerciements à :*

- Mes parents pour leur soutien moral et matériel,*
  
- Mon encadreur , Mr. BOUZID Aissa, Professeur et chef du département d'Electrotechnique de Constantine, pour avoir accepté de me prendre en charge et veiller à ce que ce mémoire soit achevé dans les délais.*
  
- L'ensemble des membres du jury de m'avoir fait l'honneur de juger ce travail,*
  
- Tous les enseignants qui ont participé à ma formation.*

# Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : <u>LE RESEAU ELECTRIQUE</u>	4
I. Introduction.....	6
II. le réseau électrique .....	7
II.1. Le réseau électrique et son rôle .....	7
II.2. Le système électrique verticalement intégré.....	8
II.2.1. Définition .....	8
II.2.1.a Les réseaux de transport et de répartition .....	9
II.2.1.b. Le réseau de distribution .....	9
II.2.1.b.1. Architecture du réseau de distribution HTA .....	9
II.2.1.b.2. Schémas d'exploitation.....	10
II.2.1.b.3. Régimes de neutre du réseau de distribution .....	13
II.2.1.b.4. Les défauts dans les réseaux HTA .....	14
II.2.2. Les raisons de choix du système électrique verticalement intégré .....	15
II.3. Quelques problèmes survenants sur le réseau électrique .....	16
II.3.1. Tensions harmoniques .....	16
II.3.2. déséquilibre de tension .....	16
II.3.3. papillotement .....	16
II.3.4. coupures brèves .....	16
II.3.5. creux de tension .....	16
II.3.6. surtensions temporaires .....	17
II.3.7. variation de fréquence .....	17
II.3.8. surtensions transitoires .....	17
II.3.9. variations rapides de tension .....	17
II.4. Les réglages de tension .....	17
II.4.a. Le réglage primaire de tension .....	18
II.4.b. Le réglage secondaire de tension .....	18
II.4.c. Le réglage tertiaire de tension .....	19
II.4.d. La compensation locale d'énergie réactive .....	19
III. Conclusion .....	21
CHAPITRE II: <u>LA PRODUCTION DECENTRALISEE</u>	22
I. Introduction.....	24
II. la production décentralisée.....	26
II.1. Définition .....	26
II.2.Caractéristiques de Production Décentralisée .....	27
II.2.1 Systèmes à alternateurs classiques (machine synchrone) .....	27
II.2.2 Systèmes à générateurs asynchrones .....	27
II.2.3 Systèmes à interface avec convertisseur électronique .....	27
II.3. Différents types de production décentralisée .....	27
II.3.1. Les moyens de productions d'énergie .....	27
II.3.1.a. La cogénération .....	28
II.3.1.b. Les énergies non renouvelables .....	28
II.3.1.c. Ressources énergétiques renouvelables .....	28
II.3.1.c. 1. La production d'énergie électrique à partir des éoliennes .....	30





# ***Introduction Générale***

Le marché de l'électricité est en pleine mutation. Celui-ci s'ouvre à la concurrence et l'organisation de ce secteur change profondément. En effet diverses fonctions relatives à ce domaine se décentralisent, et sont jouées par des acteurs distincts (distributeur, producteur, commerçant, régulateur, etc.), cette décentralisation est également appelée «unbundling». [2] Cette libéralisation permet donc à un producteur quelconque, après une étude de raccordement préalable, de produire et de vendre son énergie sur le marché. Ainsi, il apparaît une multiplication de producteurs indépendants.

Il faut ajouter à cela la volonté de promouvoir la production d'électricité à base d'énergie renouvelable. En effet, en accord avec le protocole de Kyoto fixant à 21% la part d'électricité produite à base d'énergie renouvelable, dans le but d'éliminer les gaz à effet de serre, la commission européenne s'est fixée des orientations à court terme pour le développement de ces énergies. [2]

Ainsi, différentes technologies de productions d'énergie sont d'hors et déjà disponibles pour atteindre ces objectifs comme les éoliennes, les panneaux solaires, les centrales de cogénération d'électricité et de chaleur, etc. Cette nouvelle donne économique va, par le biais de ces Productions Décentralisées d'Energies (PDE), venir impacter le fonctionnement du réseau électrique de distribution. En effet, au schéma classique, avec une production en amont de la distribution, s'ajoute la connexion de ces PDE, qui de par leur puissance, est réalisée sur le réseau de distribution. Il est à prévoir que cette production d'énergie va tendre à s'accroître dans les années à venir, amenant avec elle un problème d'intégration dans le réseau actuel de la distribution.

L'impact de ce type de générations sur le fonctionnement du réseau n'est pas négligeable et celles-ci amènent des problèmes de réglage de protections, de qualité d'énergie, de contrôle de la tension, etc. [2]. Il convient donc de rechercher des solutions innovantes à ces problèmes. Les travaux présentés dans ce mémoire se focalisent sur les problèmes de tension dus à l'introduction de productions au niveau de la distribution.

La production sur le réseau de distribution n'étant pas observable, les méthodes de contrôle de tension existants sur le transport ne sont pas directement applicables sans investissements lourds en matériels de mesures, de transmissions et de traitements de l'information. L'effacement des problèmes de tension est envisagé par la participation des PDE aux réglages.

Les travaux seront donc développés en quatre chapitres:

Le premier chapitre expose une présentation des acteurs de l'étude à savoir, le réseau électrique, son rôle où l'on s'intéresse aux réseaux de distribution avec leurs différentes architectures ensuite les différents problèmes survenants sur ces réseaux ainsi que les réglages de tension existants.

Dans le deuxième chapitre nous exposerons les définitions de PDE ou GED ainsi que ces différents types et l'on détaille la production éolienne et photovoltaïque avec leurs caractéristiques ensuite les conditions de raccordement avec le réseau.

Le troisième chapitre explique les différents effets du raccordement de ces PDE sur le réseau de distribution. On s'intéressera à l'impact de la production décentralisée sur le plan de la tension.

Le quatrième chapitre détaille les moyens de régulation de la tension au point de connexion d'une source de production décentralisée avec différents types de régulateur sur plusieurs scénarii.

**Chapitre I :**

***Le réseau électrique***



**I. introduction :**

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs [2]. Le « système » réseau électrique met donc en oeuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Ainsi, des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence ; ceux-ci couplés aux divers automates, ont la charge de garantir la continuité de service du système [2].

Aussi, nous allons parler de l'évolution des réseaux HTA. Le domaine d'application, leurs architecture et exploitation, ainsi leur rôle dans le système électrique. Cependant le réseau peut être soumis à des perturbations se propageant vite et sur une partie étendue, pour cela on donne une liste de défauts qui peuvent intervenir dans le réseau électrique et qui peuvent avoir un impact critique pour tout le système électrique. Ces perturbations peuvent être, entre autres, accentuées par des productions locales ajoutées sur le réseau de distribution.

## II. le réseau électrique :

### II.1. Le réseau électrique et son rôle :

Les premières centrales électriques ont été construites par des industries pour s'autoalimenter en courant continu. L'usage public de l'électricité n'a réellement débuté qu'après l'Exposition Universelle de 1881. Les premières concessions municipales de production et de distribution d'électricité sont alors faites à des entreprises privées ou à des régies municipales pour l'éclairage public et l'alimentation de particuliers.

Le courant alternatif s'est généralisé avec l'évolution technologique qui a permis d'adapter les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs. [1]

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution.

Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs. Figure (I-1). [2]

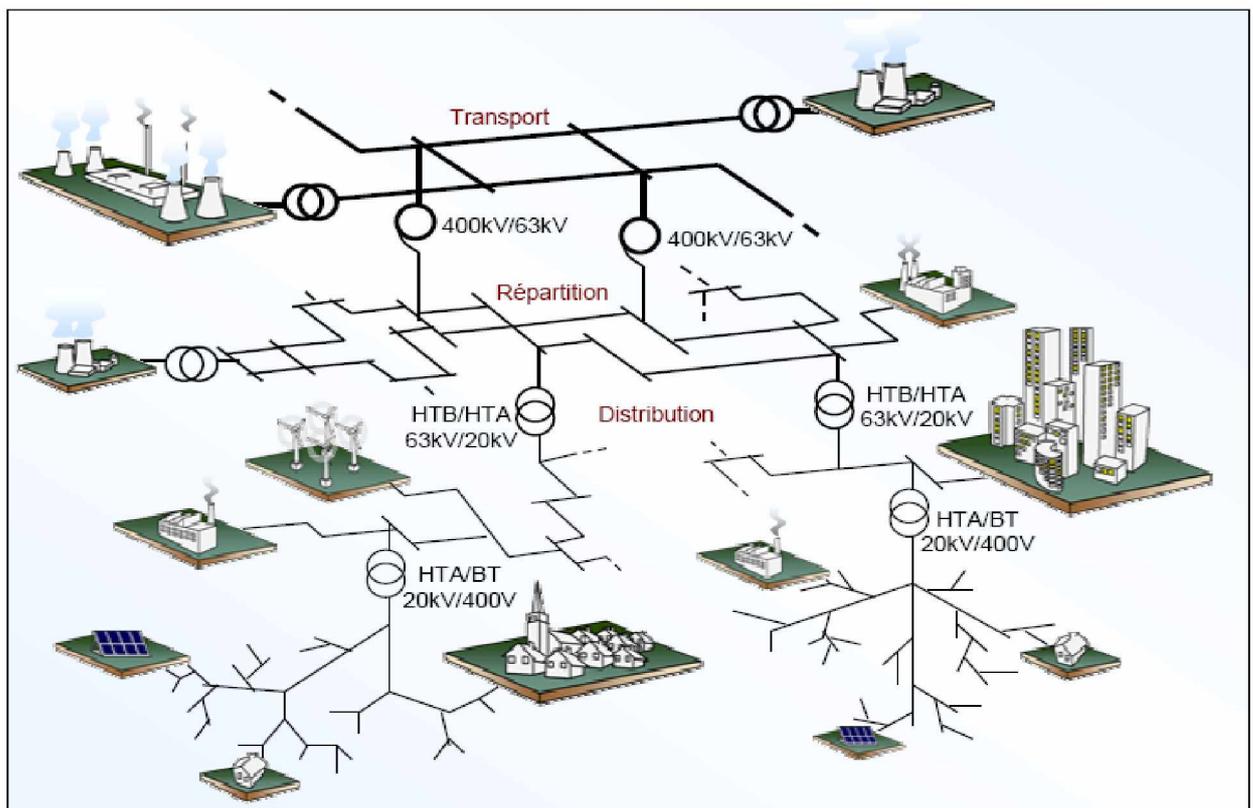


Figure (I-1) : Le réseau électrique

Le réseau électrique est exploité de manière à assurer trois principaux objectifs :

- ∅ La distribution d'électricité doit pouvoir être garantie et ce malgré les aléas du réseau. En effet, celle-ci est un enjeu à la fois financier et de sécurité pour les biens matériels et des personnes. Ainsi l'opérateur du réseau doit être capable de faire face à ces aléas et d'éviter les dégâts potentiels ainsi que leurs propagations. Cet enjeu de sûreté de fonctionnement en régime normal et en régime perturbé est un des premiers objectifs. [2]

- Ø L'onde de tension fait l'objet d'engagement contractuel que l'opérateur se doit de tenir en respectant une règle d'égalité c'est-à-dire une impartialité entre clients en conservant une continuité de service maximale. [2].
- Ø Le dernier objectif d'exploitation est un objectif économique, l'exploitation doit être menée de manière optimale dans le but de réduire les pertes ainsi que les coûts de maintenance et d'investissement. D'autre part l'exploitation doit favoriser l'ouverture du marché de l'électricité. [2]

## II.2. Le système électrique verticalement intégré :

### II.2.1. Définition :

Le développement à grande échelle des réseaux électriques s'est fait pendant les trente dernières années, pour des raisons techniques et économiques, sous la forme d'un monopole verticalement intégré. 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 nécessité 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 répartis sur l'ensemble du territoire. [1]

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension (de 150kV à 800 kV, généralement en Europe de 225 kV et 400 kV) pour être transporté sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition (de 30 kV à 150 kV, généralement en Europe de 63 kV et 90 kV), puis de distribution (MT: 3 kV à 33 kV, généralement en Europe de 20 kV) d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension (BT : 110V à 600V, généralement en Europe de 230/400 V). Cette structure verticale "transport – répartition – distribution" est schématisée sur la figure (I.2). [1]

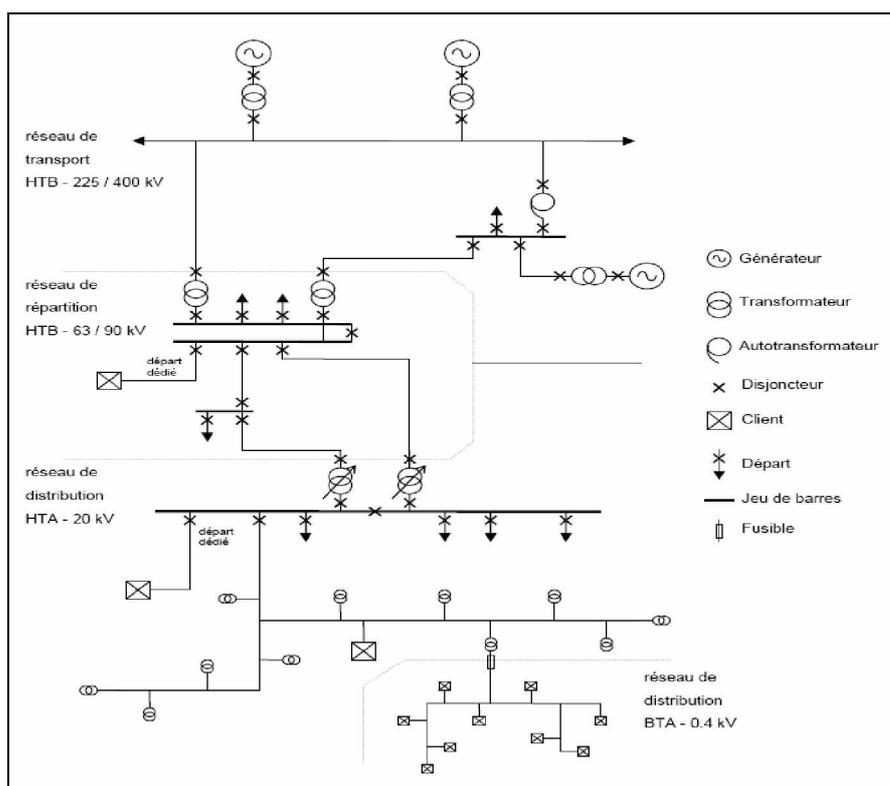


Figure (I.2) : Organisation des différents niveaux de tension du système électrique.

### **II.2.1.a Les réseaux de transport et de répartition :**

La première de ces divisions est le réseau de transport (**THT**) ou réseau de haute tension de niveau B (**HTB**). Sur ce réseau sont connectées les centrales de production classique comme les centrales nucléaires, hydrauliques assurant 80% de la production électrique. Ces réseaux ont une architecture maillée, ainsi les productions ne sont pas isolées mais toutes reliées entre elles. Cette structure permet une sûreté de fonctionnement accrue par rapport à une structure de réseau dite radiale puisqu'elle assure la continuité du service ou d'alimentation en cas d'aléas comme la perte d'une ligne, d'une production, etc. En effet, lors de l'ouverture d'une ligne, le fait d'avoir cette structure maillée permet au flux de puissance de trouver un nouveau chemin pour contourner cette ligne en défaut et donc de garantir la continuité de l'alimentation en aval du problème. C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau nationale et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau internationale. [2]

Le deuxième niveau de tension est le réseau de répartition (**HT**), celui-ci assure le transport des réserves en électricité composées de l'énergie puisée au réseau de transport et de productions de plus petites échelles vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci. [2]

La gestion de la tension et de la fréquence des réseaux de transport et de répartition est effectuée de manière centralisée. Des mesures de puissances active et réactive et de tension sont effectuées sur le réseau et sont rapatriées aux centres de téléconduite. Ces mesures sont ensuite disponibles aux opérateurs en charge du bon fonctionnement du réseau ainsi que de la coordination des productions. L'opérateur en charge du bon fonctionnement de ces réseaux est le gestionnaire du réseau de transport, le RTE (Réseau de Transport d'Electricité), cette entité exploite et entretient le réseau public de transport. [2]

Notons ici que la terminologie "réseau de répartition" tend à disparaître, ce niveau de tension étant généralement englobé dans le terme "transport".

### **II.2.1.b. Le réseau de distribution :**

La troisième et dernière subdivision est le réseau de distribution **MT**. Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Son exploitation est gérée par un Gestionnaire de Réseau de Distribution (**GRD**). Pour des raisons de coût et de simplicité technique, Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale. A la différence d'une structure maillée une structure radiale est une structure arborescente. Ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation HTB/HTA ou HTA/BT vers le point de consommation considérée. Ceci permet notamment la localisation et l'élimination rapide de défauts, ainsi que le comptage de l'énergie aux postes sources. Cette structure est donc parfaitement adaptée à un système verticalement intègre dans lequel la production est centralisée et la consommation distribuée. [2]

#### **II.2.1.b.1. Architecture du réseau de distribution HTA :**

Les réseaux de distribution sont en général conçus de façon hiérarchisée dans le sens des transits de puissance. L'architecture générale du réseau de distribution HTA est représentée sur la figure (I-3), [3].

A partir d'un point de connexion au réseau HTB, un jeu de barres alimente deux transformateurs HTB/HTA. Leur puissance est dimensionnée afin qu'un seul transformateur puisse alimenter l'ensemble de la charge du réseau au cours d'une période de maintenance sur l'une des deux branches du poste (redondance au niveau des branches du poste).

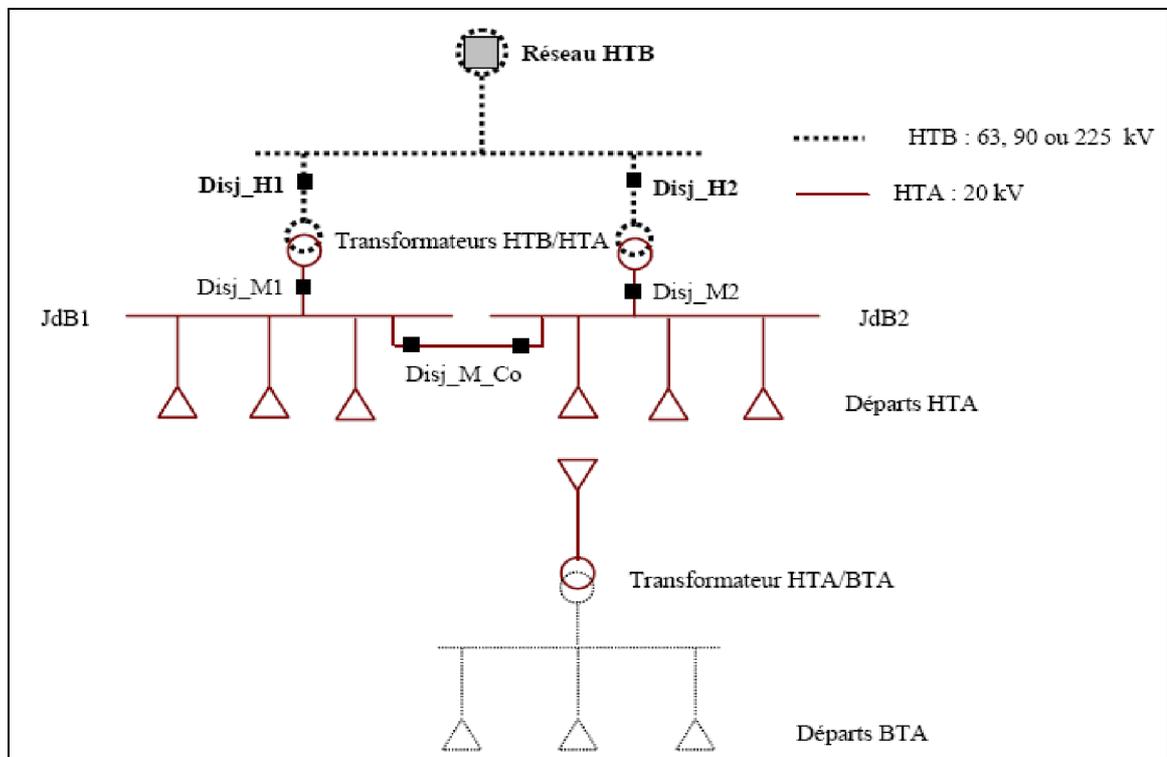


Figure (I-3) : Architecture générale du réseau de distribution HTA

### II.2.1.b.2. Schémas d'exploitation:

✓ Les postes sources HTB/HTA :

Les postes sources, en général alimentés par le réseau de répartition à 63 ou 90 kV (quelquefois directement par le réseau de transport à 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.4.a). En seconde phase, avec l'augmentation des charges à desservir, un second transformateur est ajouté (figure I.4.b) et le poste est généralement raccordé à une deuxième arrivée HTB (HT2) appelée "garantie ligne". En phase finale, un troisième (et quelquefois plus) transformateur est ajouté en double attache (figure I.4.c). [1]

On a dans la figure (I.4.d) le schéma réel d'un départ du réseau de distribution.

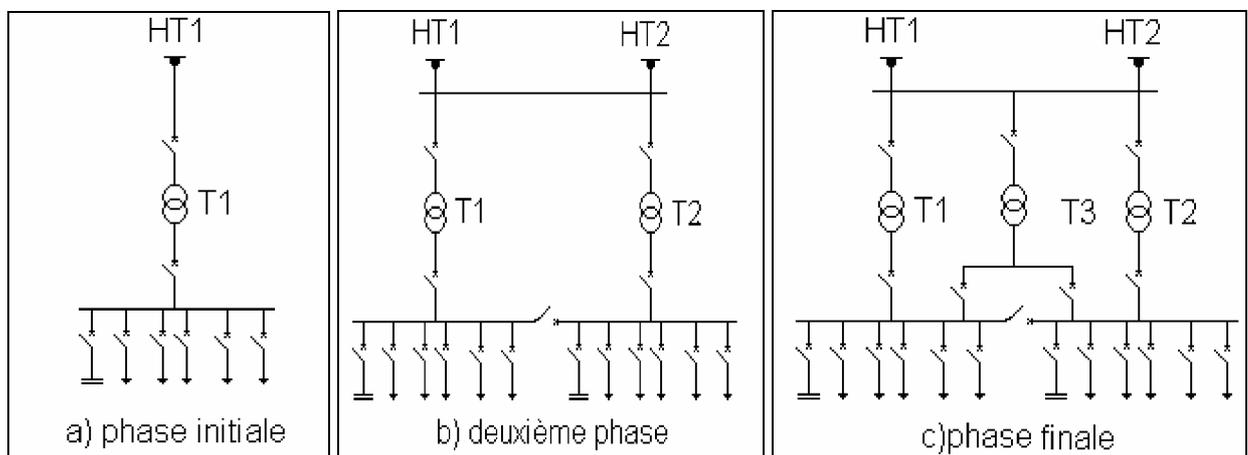


Figure (I.4) : Schéma de principe des postes sources HTB/HTA

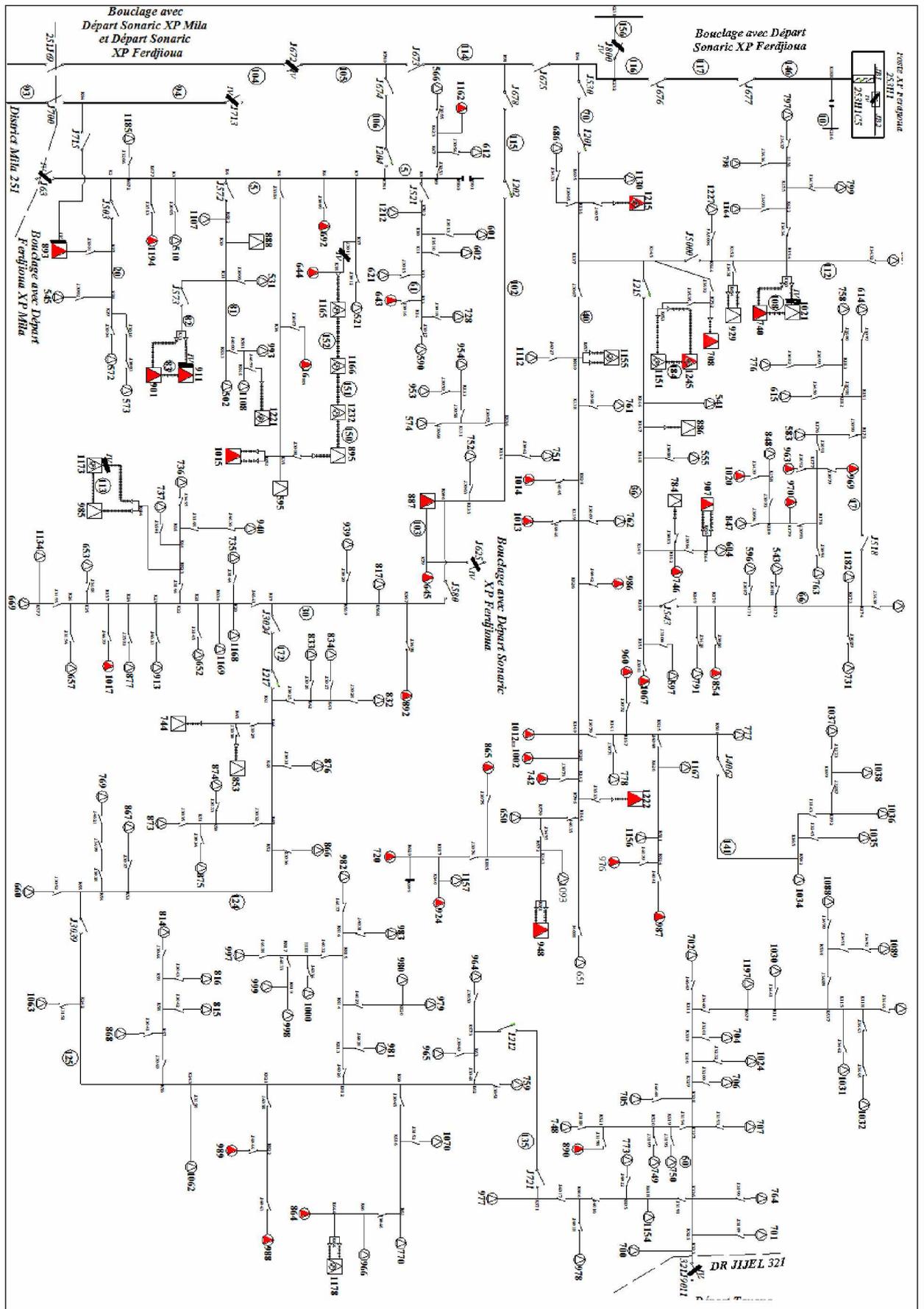


Figure (I.5) le schéma réel d'un départ du réseau de distribution.

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. [1]

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. [1]

✓ Les lignes ou départs HTA :

Le réseau HTA a une structure arborescente radiale le plus souvent bouclable 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 de charges à desservir, le réseau de distribution sera réalisé soit en lignes aériennes, soit en câbles souterrains. [1]

a. Réseaux HTA aériens :

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. [1]

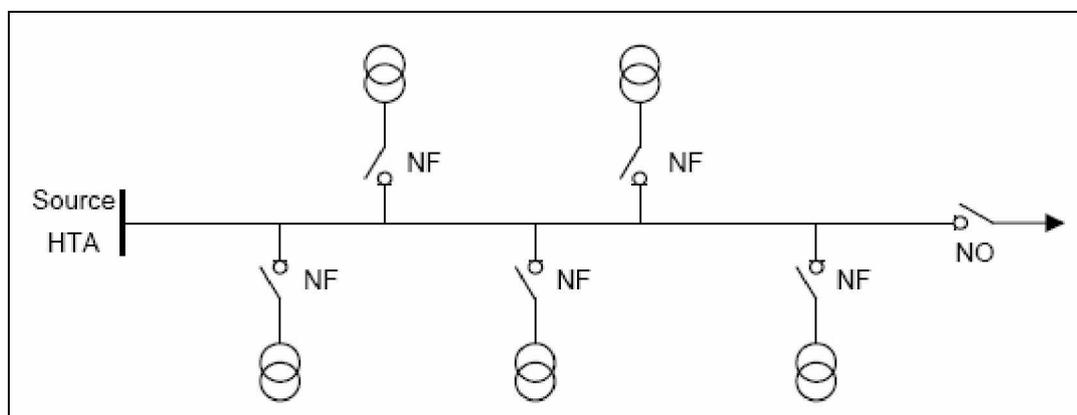


Figure (I.6) : Simple dérivation

NF désigne un interrupteur normalement fermé, et NO un interrupteur normalement ouvert.

b. Réseaux HTA souterrains :

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.6) ou en coupure d'artère (figure I.7). [1]

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. [1]

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 notable du surcoût lié à cette technique. De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages. [1]

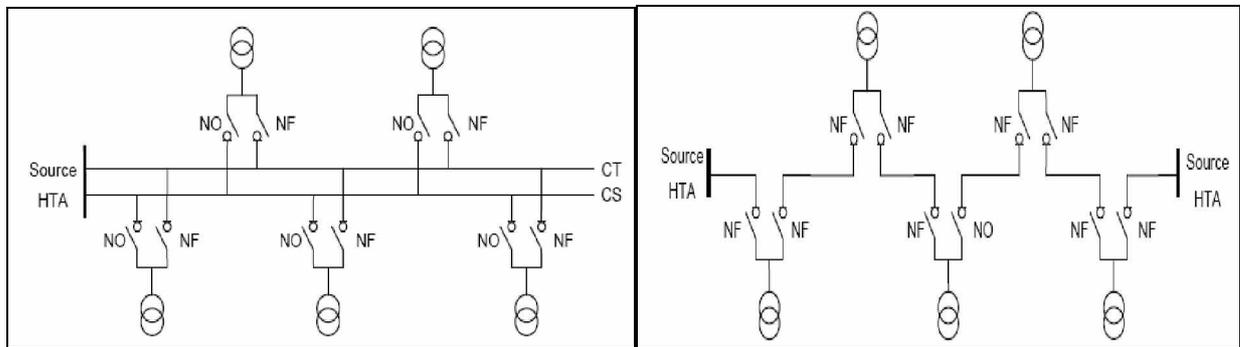


Figure (I.7): Double dérivation

Figure (I.8) : Coupure d'artère

**II.2.1.b.3. Régimes de neutre du réseau de distribution :**

Lors d'un défaut dans le réseau de distribution, les valeurs des courants et des tensions des conducteurs dépendent du régime du neutre du réseau. Chaque régime de neutre entraîne donc l'installation de matériels spécifiques pour le niveau d'isolement, les conditions d'exploitation et d'entretien, les systèmes de protection et les méthodes de détection et localisation des défauts. Le régime de neutre adopté doit être cohérent avec la structure du réseau de distribution (niveau de tension, longueur des départs, réseau souterrain ou aérien, densité de charge) et a une incidence sur les niveaux de sécurité et de qualité de service. On rencontre ainsi à travers le monde des régimes de neutres variés. [3]

Régime de neutre	Schéma de raccordement	Pays
Neutre isolé		Italie Japon Norvège
Bobine de compensation (Bobine de Petersen)		Allemagne Grande-Bretagne (rural)
Neutre directement à la terre		Canada Etats-Unis
Neutre impédant (Zn : quelques dizaines d'ohms)		Belgique France Grande-Bretagne (Urbain) Irlande Suède Finlande

Tableau (I-1) : Différents régimes de neutres du réseau de distribution dans le monde. [3]

### II.2.1.b.4. Les défauts dans les réseaux HTA :

Le risque d'apparition d'un incident sur le réseau n'est pas nul car lié à de nombreux paramètres aléatoires. Ainsi, les courts-circuits peuvent avoir diverses origines :

- **Electriques** : C'est l'altération des isolants des matériels de réseau, par exemple. En effet, les matériels électriques que l'on trouve sur le réseau ou dans les postes comportent des isolants (solides, liquides ou gazeux) constitués d'assemblages plus ou moins complexes placés entre les parties sous tension et la masse. Ces isolants subissent des dégradations au cours du temps qui conduisent à des défauts d'isolement et donc des courts-circuits. [3]
- **Atmosphériques** : Les lignes aériennes sont soumises aux perturbations extérieures telles que la foudre, les tempêtes ou le givre. [3]
- **Mécaniques** : C'est la chute d'un corps sur un conducteur ou la dégradation mécanique de conducteurs consécutive à des agressions extérieures par des engins de terrassement par exemple. [3]
- **Humaines** : Ce sont les fausses manoeuvres telles l'ouverture d'un sectionneur en charge par exemple. [3]

On trouve plusieurs catégories de défauts dans les réseaux HTA. Ceux-ci sont caractérisés par leur type, leur durée et l'intensité du courant de défaut. Ainsi, on distingue :

#### A. Types et caractéristiques des défauts :

##### 1. Types des défauts : [3]

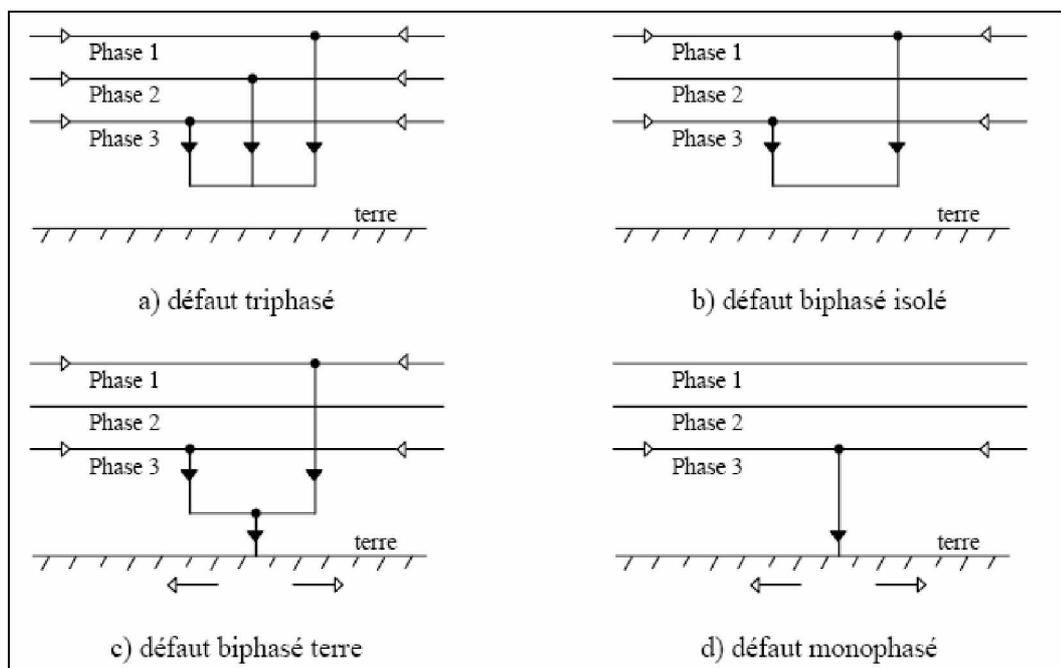


Figure (I-9) Différentes types de défauts

L'existence de défauts multiples, en particulier les défauts monophasés, engendre des phénomènes ou d'autres types de défaut en fonction de la localisation et du temps.

- **Défaut double** : Ce sont deux défauts d'isolement phase terre simultanés entre deux phases différentes d'un même réseau alimenté par un même transformateur HTB/HTA sur des terres différentes éloignées géographiquement. Les deux défauts peuvent se trouver sur le même départ HTA ou sur deux départs HTA différents. Les défauts doubles font circuler dans les terres, à l'endroit des deux défauts, des courants élevés, provoquant par la même des montées en potentiel importantes.

• **Défaut évolutif** : C'est un défaut d'un type donné qui évolue vers un nouveau type dans un temps variable de quelques millisecondes à plusieurs centaines de millisecondes. Les plus fréquents sont:

- § Un défaut monophasé qui évolue en défaut polyphasé (bi ou triphasé)
- § Un défaut monophasé qui évolue en défaut double.

## 2. Caractéristiques des défauts : [3]

### 2.1. Caractéristiques des défauts monophasés :

• **Défaut auto-extincteur** : Un défaut auto-extincteur monophasé est un défaut qui s'élimine seul, sans coupure de l'alimentation ou fermeture du disjoncteur shunt.

• **Défaut réamorçant** : Un défaut réamorçant est un défaut monophasé auto-extincteur, qui réapparaît périodiquement (dans environ 90% de cas, le défaut monophasé auto-extincteur est constitué d'un seul amorçage). Le temps entre deux réamorçages peut varier de quelques millisecondes à quelques centaines de millisecondes. Si le temps entre deux réamorçages successifs est inférieur à 200 ms, on considère cette succession de défauts comme le même défaut. [3]

• **Défaut en régime établi à 50Hz** : Un défaut en régime établi 50Hz comporte un courant ayant essentiellement une composante à 50Hz après son apparition.

### 2.2. Caractéristiques des défauts polyphasés :

Les défauts polyphasés sont la plupart du temps des défauts en régime établi 50Hz. Ils sont, dans leur très grande majorité, éliminés par l'ouverture d'un disjoncteur en réseau. Ils entraînent toujours lors de leur apparition, un creux de tension, plus ou moins important en fonction de la puissance de court circuit. Le creux de tension provoqué par un défaut polyphasé est généralement ressenti par la clientèle, bien au-delà du seul départ HTA concerné par le défaut. Les défauts polyphasés peuvent être, dans de très rares cas, des défauts auto-extincteurs. [3]

## II.2.2. Les raisons de choix du système électrique verticalement intégré :

Le système électrique est basé sur un monopole production – transport – distribution pour des raisons économiques liées au coût de construction et d'entretien des installations de production, de transport et de distribution de l'électricité, ainsi que politiques. Cette structure verticalement intégrée était aussi favorisée par les obligations de service public du distributeur d'énergie électrique comme la continuité de service, l'égalité de traitement des consommateurs, ou l'obligation de fourniture. [1]

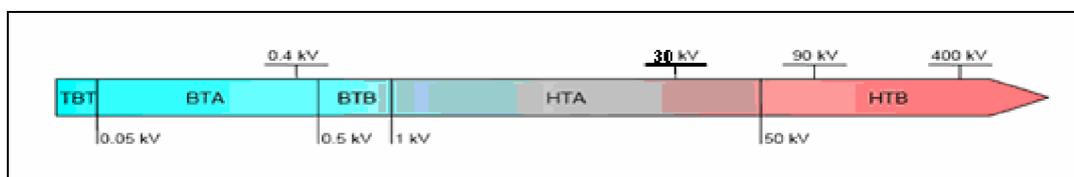


Figure (I.10) : Niveaux de tension normalisés

La définition des différents niveaux de tension résulte à la fois de choix historiques et d'optimisations technico-économiques entre le coût d'installation et de maintenance des ouvrages et leur capacité à transporter l'énergie du point de production au client final en générant un minimum de pertes. Ainsi, le niveau de tension HTA à 30 kV s'est imposé pour la distribution car il permet de minimiser le nombre de postes sources et de limiter les chutes de tension tout en utilisant des matériels peu exigeants en termes de tenue de tension. [1]

## II.3. Quelques problèmes survenant sur le réseau électrique :

### II.3.1. Tensions harmoniques : [4]

Description : Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont les fréquences correspondent à des multiples entiers de la fréquence fondamentale (50 ou 60 Hz). On considère dans la présente définition les harmoniques de longue durée, excluant les phénomènes transitoires isolés.

Causes : Les harmoniques sont créés par des appareils dont la caractéristique tension/courant n'est pas linéaire, comme c'est le cas avec les convertisseurs électroniques de puissance des entraînements de moteurs, les redresseurs utilisés pour l'électrolyse, les fours à arc, etc.

### II.3.2. déséquilibre de tension : [4]

Description : Cet indice sert à caractériser les asymétries d'amplitude et de déphasage des tensions triphasées en régime permanent. Le taux de déséquilibre de tension est défini, suivant la méthode des composantes symétriques, comme le rapport existant entre le module de la composante inverse de la tension et celui de la composante directe.

Causes : Les déséquilibres de tension qui s'appliquent aux tensions triphasées ont deux causes principales, soient les asymétries d'impédance des lignes du réseau et les déséquilibres de charge.

### II.3.3. papillotement : [4]

Description : Le papillotement traduit l'inconfort physiologique éprouvé au niveau de la vision à la suite de changements répétitifs de luminosité de l'éclairage.

À certaines fréquences, l'œil peut percevoir l'effet sur l'éclairage de très faibles variations de tension. La plupart des appareils ne sont toutefois pas perturbés par ce phénomène.

Causes : Le papillotement est dû aux variations répétitives de tension causées par certaines charges industrielles comme les machines à souder, les laminoirs, les gros moteurs à charge variable, les fours à arc, etc.

### II.3.4. coupures brèves : [4]

Description : Les coupures brèves correspondent à la perte momentanée de la tension d'alimentation sur toutes les phases pour des durées inférieures à 1 minute.

Causes : La plupart du temps, les coupures brèves sont dues à l'action des dispositifs de protection des réseaux en vue d'éliminer les défauts. Sur les lignes à haute tension, il est de pratique courante d'effectuer un réenclenchement automatique dans le but de réalimenter le plus rapidement possible une ligne perturbée par un défaut fugitif. Ainsi, au lieu d'une interruption, les clients alimentés par la ligne perturbée ne subissent qu'une coupure brève dont la durée peut varier de 0,5 à 1,5 seconde, en l'absence de contraintes de coordination de protection.

### II.3.5. creux de tension : [4]

Description : Les creux de tension sont des réductions soudaines de plus de 10% de la tension nominale, suivies de son rétablissement après une courte durée variant entre 8 millisecondes et une minute.

Causes : Les creux de tension sont généralement attribuables à de forts appels de courant dus à des défauts du réseau ou des installations des clients. Il s'agit d'événements aléatoires imprévisibles pour la plupart. La fréquence annuelle de ces événements dépend largement du type de réseau et du point d'observation, et leur répartition sur une année peut être très irrégulière.

### II.3.6. surtensions temporaires : [4]

Description : Les surtensions temporaires sont des hausses soudaines de la valeur efficace de la tension de plus de 110% de la tension nominale, laquelle se rétablit après une courte durée. Les surtensions temporaires comprennent des durées entre 8 millisecondes et une minute.

Causes : Les surtensions temporaires peuvent être attribuables à des défauts, à des délestages de charge ou à des phénomènes de résonance et de ferrorésonance.

Le plus souvent, elles résultent des surtensions qui se produisent sur les phases saines lors de courts-circuits monophasés à la terre, par exemple.

### II.3.7. variation de fréquence : [4]

Description : La fréquence nominale de la tension alternative fournie par le réseau est de 50 ou 60 Hz. Cette valeur est déterminée par la vitesse des alternateurs des centrales.

Causes de variations : Le maintien de la fréquence d'un réseau dépend de l'équilibre établi entre la charge et la puissance des centrales. Comme cet équilibre évolue dans le temps, il en résulte de petites variations de fréquence dont la valeur et la durée dépendent des caractéristiques de la charge et de la réponse de la production. Par ailleurs, le réseau peut-être soumis à des variations plus importantes dues à des défauts ou des variations de charge ou de production qui causent des variations de fréquence temporaires dont l'amplitude et la durée dépendent de la sévérité de la perturbation.

### II.3.8. surtensions transitoires : [4]

Description : On classe généralement dans cette catégorie les perturbations de très courte durée, qui durent typiquement moins d'un demi-cycle, c'est-à-dire de quelques microsecondes ( $\mu\text{s}$ ) à plusieurs millisecondes (ms).

Les surtensions transitoires peuvent être unidirectionnelles ou oscillatoires et elles peuvent endommager les isolants de l'appareillage ou des composantes électroniques.

Causes : Les surtensions peuvent être reliées à :

- § des manœuvres sur les lignes et les équipements en réseau, notamment des commutations de batteries de condensateurs qui se traduisent par une onde oscillatoire amortie superposée à l'onde fondamentale et présentent une fréquence généralement comprise entre 100 Hz et 9 kHz, et d'une durée de crête inférieure à  $\frac{1}{2}$  cycle ;
- § la foudre qui se traduit généralement par une impulsion unidirectionnelle présentant, dans les cas les plus rapides, un temps de montée de l'ordre de la microseconde.

### II.3.9. variations rapides de tension : [4]

Description : Les variations rapides de tension sont des variations soudaines, mais relativement faibles, de la tension se produisant à l'intérieur des plages définies pour l'amplitude de la tension en régime permanent.

Les variations rapides de tension occasionnelles n'ont pas nécessairement beaucoup d'effet sur le papillotement, mais elles peuvent perturber certains équipements et doivent par conséquent être limitées en amplitude.

Causes : La plupart du temps, elles résultent de variations de la charge des clients ou de manœuvres sur le réseau. Elles peuvent être occasionnelles ou répétitives.

## II.4. Les réglages de tension :

La tension et la fréquence sont des paramètres très importants pour l'exploitation d'un système électrique. En effet, ces grandeurs sont les garants du bon fonctionnement de L'exploitation du

réseau tant du point de vu du consommateur, dont certaines machines tournantes ou autres appareils (transformateurs, convertisseurs, etc.) sont dimensionnés pour des valeurs de fréquences ou de tensions fixes, que du point de vu de l'exploitant puisqu'un contrôle efficace de tension et de fréquence garanti une bonne qualité et une bonne continuité de service.

Ceux-ci fixent la plage de variation limites en tension devant être respectées en chaque point de livraison ainsi que le limites de fonctionnement au delà des quelles des systèmes de coupure telles que les protections de découplage doivent intervenir. Pour le cas des réseaux de distribution, les limites de fonctionnement sont données par le Tableau. [2]

	Tension et fréquence normales	Déviations maximales de tensions autorisées	Marges de variations de fréquences autorises
BT	Un=400V Fn=50Hz	+6% -10%	± 0.05Hz
HTA	Un=20kV Fn=50Hz	± 5%	± 0.05Hz

Tableau (I – 2): Limites de fonctionnement du réseau de distribution.

Les variations de puissances consommées sur le réseau sont inévitables et dépendantes de plusieurs facteurs comme la période de la journée, les saisons ou encore les secteurs de consommations (tertiaires, industriels ou résidentiels). Or, cet équilibre entre la production et la consommation est un facteur de fluctuation de l'onde de tension. Ainsi, plus la production est importante par rapport à la consommation plus la tension sera élevée et inversement. La tension évolue donc également en permanence, le paragraphe suivant expose quels sont les dispositifs de réglage permettant de conserver la tension dans les limites admissibles. [2]

Les charges présentes sur le réseau électrique consomment une certaine quantité de puissance active mais également une part plus ou moins importante de puissance réactive selon leurs types et leurs caractéristiques. Cette puissance réactive appelée est en partie fournie par les groupes de productions connectés au réseau de transport ou encore par des dispositifs de compensations d'énergie réactive. Cependant, le transit de puissance réactive n'est pas idéal. En effet, pour ce niveau de tension, les lignes ont un caractère plus inductif que résistif, le transit de puissance réactive induit donc de forte chute de tension. De plus, le fait de faire transiter de la puissance réactive dans une ligne diminue la puissance active maximale transmissible par celle-ci. [5]

#### **II.4.a. Le réglage primaire de tension :**

Le réglage primaire de tension est assuré par les groupes de production équipés d'un régulateur primaire de tension. Grâce à ce régulateur les alternateurs fixent la tension à une valeur de consigne sur leur point de raccordement. Le principe est d'agir sur l'excitation d'alternateur pour garder le niveau de tension désiré. En effet, si l'alternateur est surexcité celui-ci va produire de la puissance réactive ce qui aura pour effet d'accroître la tension à son point de connexion. Inversement, dans le cas d'une sous excitation de l'alternateur celui-ci va absorber de la puissance réactive et donc faire diminuer la tension à ses bornes. Ceci est réalisable dans les limites propres de chaque alternateur. [6]

#### **II.4.b. Le réglage secondaire de tension :**

Comme pour la fréquence les réglages primaires sont réalisés de manière locale par chacun des groupes de production concernés. Ils agissent rapidement mais doivent être coordonnés pour éviter toute dérive ou encore pour optimiser le fonctionnement de groupes proches et éviter que certain fournissent trop de puissance réactive pendant que d'autres n'en fournissent pas ou pire en absorbent, c'est le rôle du réglage secondaire de tension (RST). [6]

Ce réglage de tension est envisagé par région ou zone. Ces zones sont des parties de réseau dont les évolutions du plan de tension sont sensiblement différentes. Sur cette zone est défini un noeud particulièrement représentatif de l'évolution de la tension, ce noeud est appelé « point pilote ». Le principe du RST est de réguler la tension en ce point pilote du réseau en agissant sur les productions de puissance réactive des groupes participants au réglage. Les mesures de tension sont fournies au RST qui calcule de nouvelles consignes de tension pour les groupes réglant dans le but de fixer la tension au point pilote. [6]

#### II.4.c. Le réglage tertiaire de tension :

Le réglage tertiaire est nécessaire pour coordonner les actions entre deux zones régies par des RST différents. Ce réglage est effectué par les opérateurs de dispatching régional et comprend le calcul des tensions aux points pilotes. [6]

Ces réglages hiérarchisés permettent de réguler la tension sur les réseaux HTB (transport et répartition). Pour le réseau de distribution le contrôle se fait localement à l'aide de systèmes gérant l'apport en puissance réactive nécessaire afin de limiter le transit de cette puissance sur les réseaux amont via les postes HTB\HTA qui occasionnent des pertes supplémentaires. [6]

#### II.4.d. La compensation locale d'énergie réactive :

Il existe sur le réseau électrique des organes de réglage de la tension répartis depuis les groupes de productions jusqu'aux consommations. En effet, les spécifications et les régimes de fonctionnement en tension ne sont pas les mêmes pour le réseau de transport et le réseau de distribution. [6]

Cette différence justifie la mise en place de moyen de réglage entre ces réseaux. La Figure (I-11) illustre les moyens de réglages existants ainsi que leur positionnement en fonction des niveaux de tension du réseau. [6]

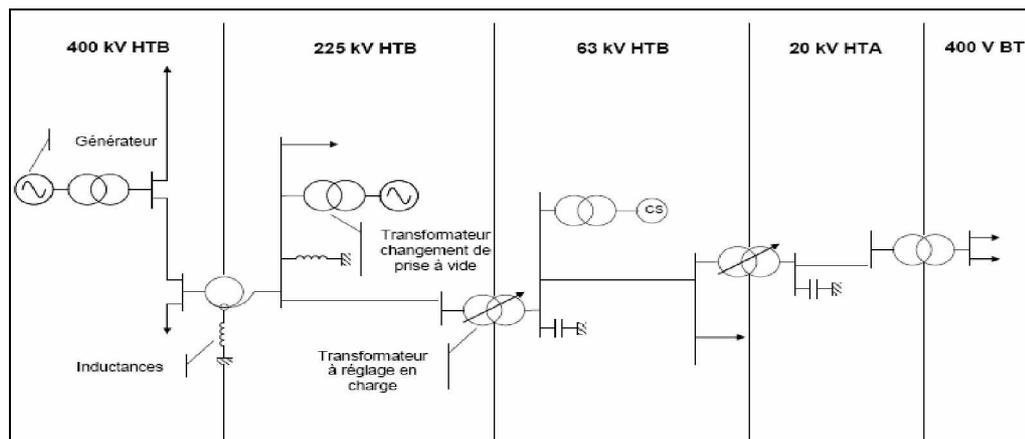


Figure (I – 11): Représentation spatiale sur un réseau des organes de réglage en tension

Ces installations sont des dispositifs de compensation de l'énergie réactive et de tenue en tension capable de fournir ou d'absorber de la puissance réactive pour un contrôle local de la tension. Ces automates permettent donc de soulager le contrôle des productions et limite ainsi le transit de puissance réactive indésirable sur les réseaux amont. [6]

∅ Transformateurs avec prises réglables en charge :

Un règleur en charge est un transformateur capable d'adapter son rapport de transformation dans une plage définie. Ceci permet de régler, en fonction du transit de puissance et/ou de la tension mesurée, la tension du secondaire du transformateur. La Figure (I-12) montre les deux types de règleurs en charge existants : [7]

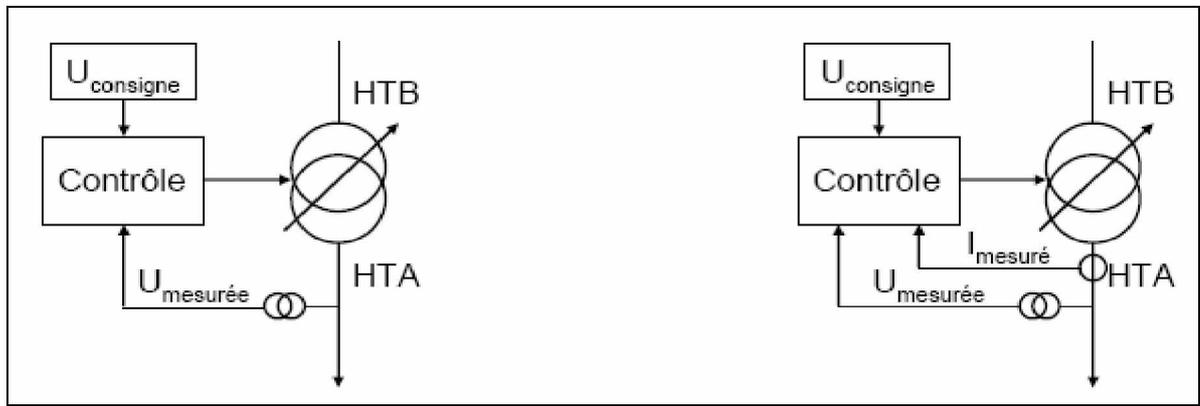


Figure (I-12).a : Régleur en charge sans compundage    b : Régleur en charge avec compundage

Un régleur en charge peut être avec ou sans compundage [7]. Le régleur en charge sans compundage change de prise lorsque la tension mesurée au secondaire du transformateur est supérieure ou inférieure à un écart de tension par rapport à une consigne donnée ( $U_{\text{consigne}}$ ). Ainsi si la tension du secondaire dépasse les bornes fixées pendant un temps supérieur à  $T_{\text{min}}$  (généralement de 60s), le changement de prise s'opère. Si un changement de prise n'est pas suffisant un deuxième suit après un temps plus court  $T_{\text{pmin}}$  (avec  $T_{\text{pmin}} < T_{\text{min}}$ ). [7]

Le régleur en charge avec compundage fonctionne quasiment de la même façon, une mesure de courant est ajoutée. La tension comparée aux tensions limites est une somme vectorielle de la tension au secondaire et de la chute de tension dans la résistance de compundage.

Ceci permet d'avoir une image de la puissance transitée via le transformateur et donc de l'état de charge du réseau aval. L'introduction de cette résistance permet d'estimer la chute de tension en un point du réseau. [7]

Cette solution n'est pas disponible dans tous les pays. De plus, la présence de (PDE) dans le réseau peut provoquer des dysfonctionnements sur la régulation standard d'un transformateur avec prises réglables en charge en modifiant les transits de puissance le traversant.

Le changement manuel des prises des transformateurs HTA/BT est également une solution existante. Cette solution n'est pas adaptée aux variations fréquentes de tension dans le réseau de distribution. [7]

### **III. Conclusion :**

Ce chapitre expose une vision sur le réseau électrique avec son rôle et surtout la partie distribution avec son architecture et schémas d'exploitation, sans oublier les différents types de réglage de tension dans le réseau électrique ainsi que d'autres problèmes.

Toutes ces stratégies existantes actuellement pour le contrôle de la tension sont efficaces dans une configuration classique d'exploitation du réseau de distribution avec un flux de puissance unidirectionnel des productions vers les consommations. Cependant, avec l'arrivée des PDE sur le réseau ces contrôles risquent d'être mis en défaut.

Nous montrerons plus loin dans ce travail qu'à cause de l'apparition de générations d'énergie sur le réseau de distribution, de par son architecture et sa conception, ce réseau n'est pas adapté pour un accueil significatif de ces productions; le flux de puissance peut devenir bidirectionnel, provoquant ainsi des problèmes de fonctionnement de certains équipements du réseau (protections, régulateurs en charge, etc.) et amenant une problématique de réglage de la tension au point de connexion.

***Chapitre II :***

*La production  
décentralisée*



## I. INTROUCTION :

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer à chaque consommateur. [29]

La nécessité de réduire les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) est aujourd'hui devenue une évidence. Cela fait de nombreuses années que le corps scientifique l'annonce, toujours avec plus de force : le réchauffement climatique, dû à ce qu'on appelle communément « l'effet de serre », est étroitement lié à ces émissions. Le CO<sub>2</sub> serait en effet responsable pour 85 % du renforcement de ce phénomène. [18]

Aujourd'hui les pouvoirs publics ne peuvent plus définir une politique énergétique sans considérer cette problématique. Un certain nombre d'accords, pris au niveau international et par lesquels les états signataires s'engagent à limiter leurs émissions de dioxyde de carbone, se traduisent à différents niveaux par une politique volontariste d'utilisation rationnelle de l'énergie. Le plus connu de ces accords est bien sûr celui concrétisé par le Protocole de Kyoto (1997). [18]

La production problématique de dioxyde de carbone est essentiellement liée au recours aux énergies fossiles charbon, pétrole et gaz principalement, dans les cycles classiques de production de chaleur et d'électricité. Il convient dès lors de maximiser les rendements de ces productions, pour valoriser au mieux l'énergie primaire utilisée. [18]

L'énergie de fission nucléaire, qui ne rejette directement pas de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique. Certes les risques d'accident lié à leur exploitation sont très minimes mais les conséquences d'un accident, même très peu probable, seraient désastreuses. Le traitement des déchets, issus de ce mode de production, est très coûteux et, pour une part, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années. De plus, l'accès à cette ressource aux pays en voie de développement nécessite des investissements lourds et un niveau de technicité qu'ils sont souvent loin d'avoir. Contrairement à une idée couramment répandue, les réserves d'uranium sont, comme celles de pétrole, limitées. [29]

C'est dans ce cadre que prennent place à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

Dans ce deuxième chapitre on s'intéressera à la production décentralisée, sa définition, ses caractéristiques ainsi que les différents types de production décentralisée telles que les éoliennes et les systèmes photovoltaïques.

Le principe de la conversion éolienne et photovoltaïque sera présenté et leurs schémas électriques équivalents seront détaillés. Enfin, on présentera le raccordement au réseau public de distribution avec les différentes conditions et contraintes qui doivent être respectées.

## II. la production décentralisée :

La libéralisation du marché d'électricité permet à tout producteur de vendre son énergie au distributeur, sous réserve d'une étude de faisabilité de raccordement préalable. Ainsi, beaucoup de moyens de production peuvent être identifiés comme PDE. [12]

### II.1. Définition :

La production décentralisée ou dispersée se définit par opposition à la production classique, par unités de grosses puissances raccordées au réseau HT, dont la localisation et la puissance ont fait l'objet d'une planification, et qui sont commandées de manière centralisée pour participer au contrôle de la fréquence et de la tension, et assurer un fonctionnement fiable et économique de l'ensemble du réseau. Ces unités centralisées sont dites "dispatchables". [8]

Par rapport aux unités classiques, les unités décentralisées sont caractérisées par des puissances ne dépassant pas 50 à 100 MW, ne sont pas planifiées de manière centralisée, ni actuellement coordonnées, elles sont généralement raccordées au réseau de distribution (<15 MW) et ne sont pas non plus actuellement destinées à assurer des services systèmes.

Cette production décentralisée se développe dans tous les pays, sur base d'unités de cogénération, d'énergies renouvelables ou de production traditionnelle, installées par des producteurs indépendants. [8]

De nombreuses raisons, techniques et économiques, justifient le développement de ce type de production, parmi lesquelles nous relevons les suivantes :

- la technologie disponible actuellement offre les garanties de fiabilité pour des unités de 100 kW à 150 MW
- les sites pour une production de puissance réduite sont plus faciles à trouver;
- la production est réalisée à proximité de son utilisation, de manière à réduire les frais de transport;
- le gaz naturel, vecteur énergétique souvent utilisé en production décentralisée, est supposé être facilement disponible dans la plupart des centres de consommation et conserver un prix stable;
- les systèmes basés sur le gaz sont construits en beaucoup moins de temps et représentent des investissements nettement moins importants en comparaison avec les grosses centrales classiques utilisant un autre vecteur d'énergie primaire;
- les rendements énergétiques supérieurs des systèmes de co-génération ou à cycle combiné (gaz et vapeur) permettent une réduction des frais de fonctionnement;
- les politiques des états pour promouvoir des technologies propres afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>, et promouvoir les énergies renouvelables par des subsides et des interventions dans les tarifs, qui conduisent à des conditions économiques intéressantes.

La caractéristique fondamentale de la production décentralisée est d'être pilotée par un autre facteur que la demande d'électricité. [8]

Il en résulte des incertitudes sur :

- la localisation géographique ;
- la dynamique du développement ;
- les niveaux et moments d'activité de production ; avec des conséquences sur le développement des réseaux électriques. Ces derniers doivent en effet être en mesure d'une part, d'accueillir la production décentralisée quand elle est active et d'autre part, d'acheminer la puissance de substitution quand la production décentralisée est inactive.

La production décentralisée a donc inévitablement un impact plus ou moins important sur les réseaux aux plans suivants : topologie ou conception, dimensionnement, gestion prévisionnelle, exploitation en temps réel. [8]

La structure du réseau pourrait dans certains cas imposer une limite à la puissance de production décentralisée qu'il peut accueillir en un point donné.

## **II.2. Caractéristiques de Production Décentralisée :**

Les systèmes de production décentralisée peuvent se caractériser par le type de générateur ou d'interface utilisé. On distingue ainsi les catégories suivantes et leurs domaines d'applications actuels, avec quelques empiétements entre catégories. [8]

### **II.2.1 Systèmes à alternateurs classiques (machine synchrone) :** [8]

Ces systèmes sont dits classiques en raison de l'utilisation de générateurs synchrones comme dans les centrales thermiques à combustible fossile ou nucléaire, et dans les centrales hydrauliques.

- Biomasse
- Energie géothermique
- Diesel
- Solaire à bac parabolique et tour
- Turbine à gaz à cycle simple
- Turbine à gaz à cycle combiné
- Vent

### **II.2.2 Systèmes à générateurs asynchrones :** [8]

- Solaire réflecteur-moteur (à miroirs paraboliques et moteurs à cycle Stirling et Brayton)
- Vent
- Houle

### **II.2.3 Systèmes à interface avec convertisseur électronique :** [8]

- Vent (avec générateur synchrone ou asynchrone)
- Photovoltaïque
- Stockage par batterie
- Stockage par bobine supraconductrice et Piles à combustible

Tout générateur destiné à être raccordé au réseau triphasé à courant alternatif 50/60 Hz doit constituer une source de trois forces électromotrices triphasées symétriques, de même ordre de succession que les tensions du réseau.

De nombreux types de GED existent qui utilisent des technologies matures ou en phase de développement. Les énergies primaires utilisées sont également très variées, d'origine renouvelable ou fossile. [1] Un panel des principales technologies mises en oeuvre est proposé ci-dessous.

## **II.3. Différents types de production décentralisée:**

### **II.3.1. Les moyens de productions d'énergie :**

Il existe plusieurs technologies de productions d'énergies électriques raccordées au réseau de distribution. Celles-ci diffèrent cependant de par leur puissance ou encore de par le type de carburant qu'elles utilisent comme le gaz naturel, l'hydrogène, le diesel ou encore des énergies

dites renouvelables comme le soleil ou le vent. Ces technologies de productions se différencient également par leur méthode de raccordement au réseau. D'une part, il y a les PDE utilisant un alternateur synchrone ou asynchrone directement connecté au réseau, d'autre part celles utilisant un interfaçage d'électronique de puissance, comme dans le cas des piles à combustibles ou des panneaux solaires. On distingue ainsi les types suivants : [2]

### **II.3.1.a. 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. [1]

### **II.3.1.b. Les énergies non renouvelables :**

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: [2]

- Le thermique à flamme, basé sur des turbines ou micro turbines à vapeur.
- Les moteurs à combustibles fossiles : Les turbines à gaz et les groupes diesel sont des moyens de productions utilisant une génératrice synchrone pour transformer l'énergie mécanique développée par celles-ci en énergie électrique. Ce type de production est le plus souvent envisagé pour des cogénérations de quelques mégawatt. [2]
- 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. Les puissances disponibles de ce type de source varient en fonction de la technologie d'électrolyte considéré, de quelques kilowatts à quelque mégawatts. [1]

### **II.3.1.c. Ressources énergétiques renouvelables :**

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici 20-30 ans, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux. [9]

Les générateurs d'origine renouvelable sont les générateurs dont la source primaire est inépuisable ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Autrefois, moulins à eau, à vent, bois de feu, traction animale, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire. L'avantage principal de ces énergies est le fait

qu'elles soient propres, c'est-à-dire, qu'elles supposent avoir un faible impact environnemental. Leur principale limitation est leur caractère intermittent car la puissance de sortie dépend en tout instant de la disponibilité de la source primaire. On peut citer l'hydro-électricité, la biomasse, la valorisation des déchets et sous produits industriels, la géothermie, etc. mais les générateurs d'origine renouvelable les plus répandus (sources primaire réparties et disponible largement) et les mieux adaptés sont les générateurs éoliens et les générateurs photovoltaïques. [10] Les principales technologies sont:

- 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 mue par la force de l'eau qui est due soit à 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. [1]
- 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 à 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. [1]
- 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. [1]
- Solaire photovoltaïque. Les panneaux solaires convertissent directement l'énergie reçue par rayonnement solaire en énergie électrique à courant continu. Ils sont très utilisés pour l'alimentation de sites isolés (non connectés au réseau) en association avec un système de stockage. [1]
- 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 concentré sur un échangeur par des miroirs paraboliques. [1]
- 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 de déchets industriels et domestiques. [1]
- 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 (protégés en France par la loi Littoral du 3 janvier 1986) en causant un ensablement ou un envasement du site. [1]
- 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. [1]

Après ce bref bilan des ressources énergétiques exploitables, on va s'intéresser aux systèmes de production existants, en particulier relatifs aux sources éoliennes et solaires.

### II.3.1.c. 1. La production d'énergie électrique à partir des éoliennes :

Les systèmes éoliens transforment l'énergie cinétique du vent en énergie électrique à travers des aérogénérateurs. Les générateurs éoliens peuvent être connectés au réseau individuellement ou ils peuvent être groupés pour former des parcs éoliens. La plage de puissances des systèmes éoliens varie entre quelques kW (systèmes mini éoliens) jusqu'aux installations de quelques MW (grands systèmes éoliens). La conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique se fait en deux étapes : au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique puis au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique. En fonction de la génératrice, il existe actuellement trois principaux types de systèmes éoliens : système éolien à vitesse fixe avec machine asynchrone à cage (Figure II.1 (a)), système éolien à vitesse variable avec machine synchrone à inducteur bobiné ou à aimants (Figure II.1 (b)), et système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation (Figure II.1 (c)).[10]

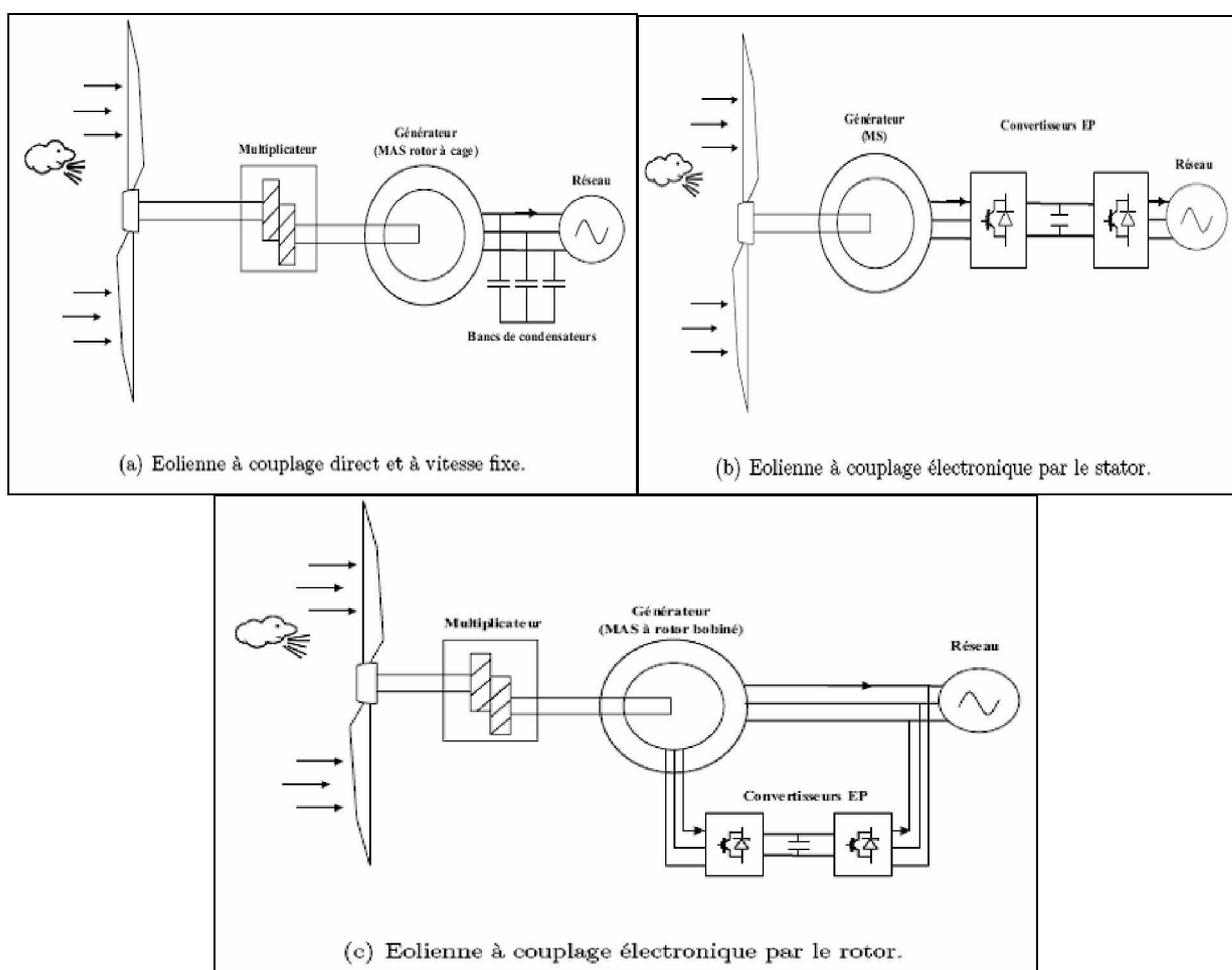


Figure (II.1) : Différents types de systèmes éoliens.

(a) Les éoliennes à vitesse fixe directement couplées au réseau, généralement basées sur une génératrice asynchrone à cage.

(b) Les éoliennes à vitesse variable commandées par le stator au moyen de convertisseurs statiques. Ces éoliennes peuvent être équipées de génératrices asynchrones à cage, mais elles sont plus généralement équipées de machine synchrone à rotor bobiné ou de machine à aimants permanents.

(c) Système éolien à vitesse variable avec machine asynchrone à double alimentation.

Le premier système consiste en un générateur d'induction à cage directement connecté au réseau la fréquence du réseau (et le nombre de pôles) détermine au glissement près la vitesse du générateur ainsi que celle de la turbine. Le multiplicateur permet d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à la fréquence électrique souhaitée. Par conséquent, la vitesse de rotation de la turbine est pratiquement fixée pour n'importe quelle vitesse du vent. C'est pour cette raison que cette structure correspond à un générateur éolien à vitesse fixe. Un générateur asynchrone à cage consomme toujours de la puissance réactive. Cette énergie réactive est indésirable et est généralement compensée en partie ou entièrement par des bancs de condensateurs ou autres compensateurs de réactif. [10]

Les autres deux types de systèmes éoliens de la Figure 2.1 (b et c) sont des systèmes à vitesse variable. Dans ces systèmes, la vitesse mécanique de la turbine et la fréquence du réseau sont découplées. Pour obtenir ce découplage, on utilise une interface d'électronique de puissance. De cette manière, la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. [10]

### *i. Types de turbine : [9]*

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- les turbines éoliennes à axe horizontal ;
- les turbines éoliennes à axe vertical.

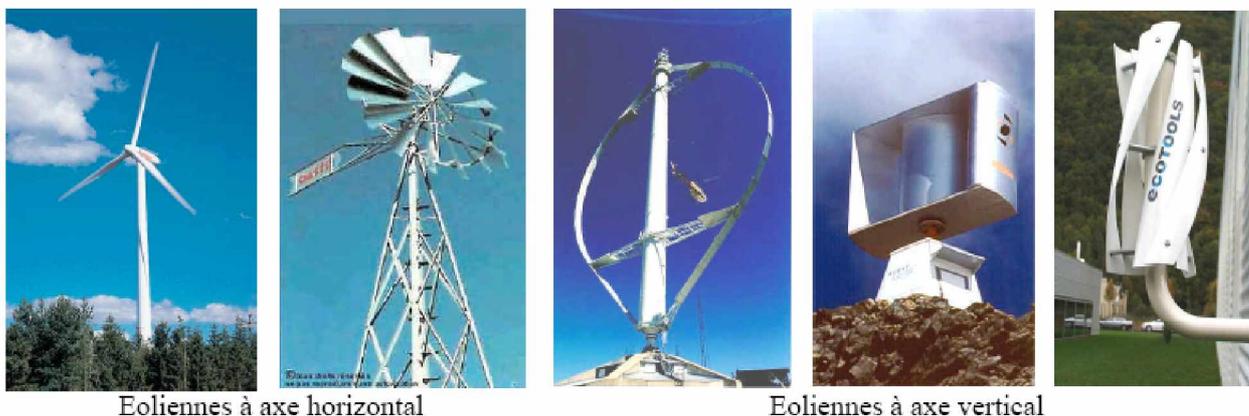


Figure (II.2): Technologies d'éoliennes

### *ii. Modélisation de différentes technologies de générateurs éoliens sur un réseau moyenne tension :*

#### *a. Présentation de la thématique : [11]*

Historiquement, les premières unités de production décentralisée raccordées sur les réseaux moyenne tension étaient des turbines à combustion (gaz, charbon, ...) ou des turbines hydrauliques. La disponibilité de leur ressource naturelle garantit un flux constant des puissances générées et donc a priori toute cause éventuelle d'oscillations de puissance. Il n'en est pas de même pour les générateurs éoliens dont la puissance des unités actuellement en cours d'installation dépasse le mégawatt. C'est pourquoi il est important de disposer de modèles des différentes technologies de générateurs éoliens raccordables à un réseau moyenne tension (fig(II.3)).

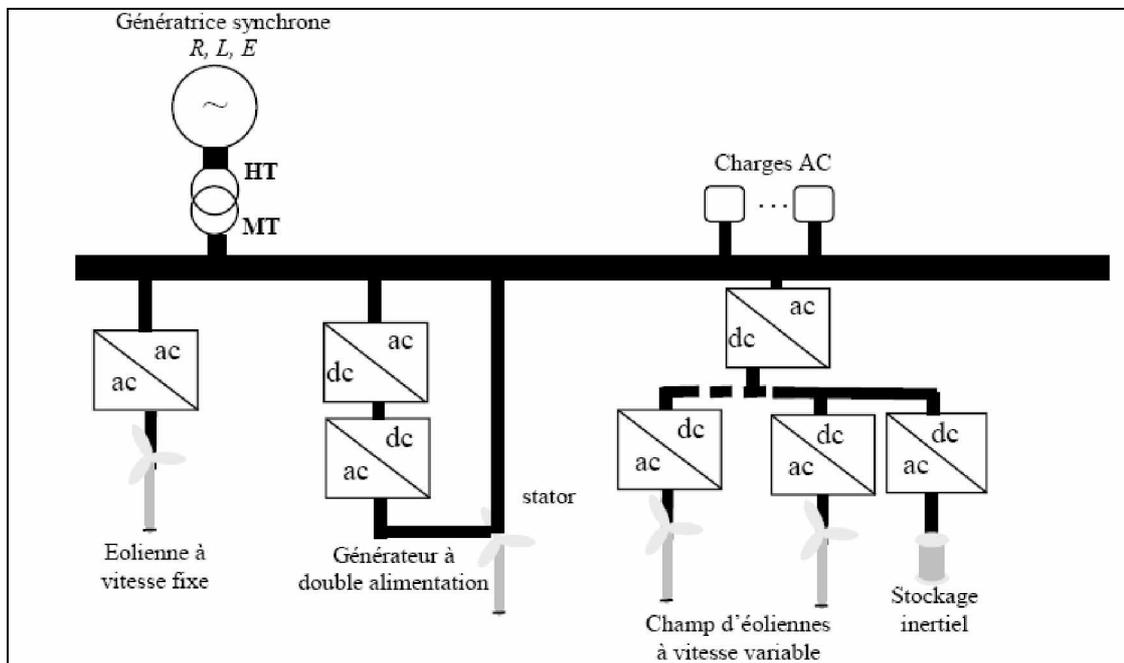


Figure (II.3) : Exemple de productions décentralisées éoliennes sur un réseau moyenne tension

**b. Les éoliennes à vitesse fixe :** [12]

ü Principe général :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie ces éoliennes mettent en oeuvre des machines asynchrones à cage d'écureuil, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse *-mec* est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice (figure II.4).

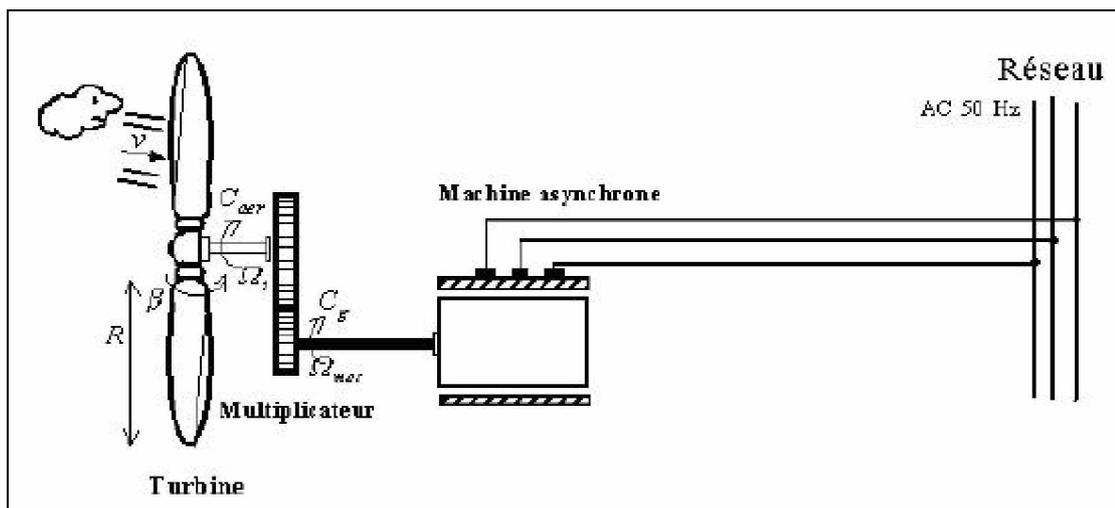


Figure (II.4) – Eolienne directement connectée au réseau

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (*-mec*) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme  $-s = 1500tr=mn$ , ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne. [9]

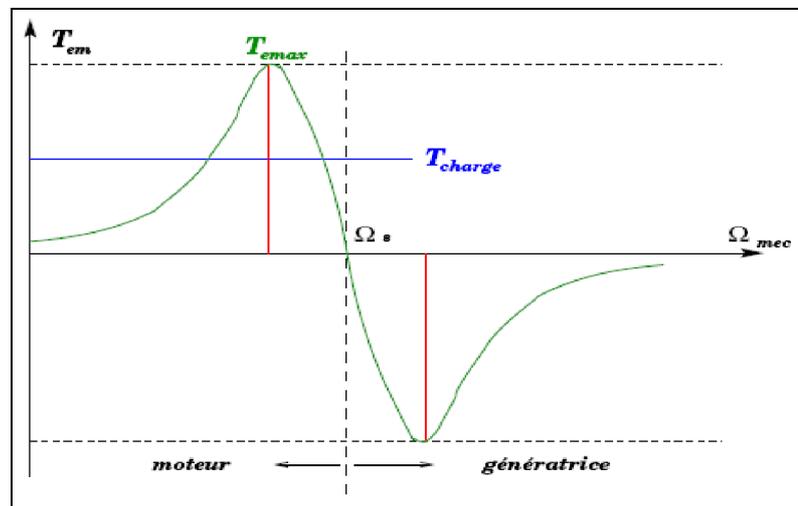


Fig. (II.5) : Caractéristique couple- vitesse d’une machine asynchrone

On peut distinguer deux technologies d’éoliennes à vitesse fixe : Les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

ü Les éoliennes à décrochage aérodynamique :

Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en général à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent. [12]

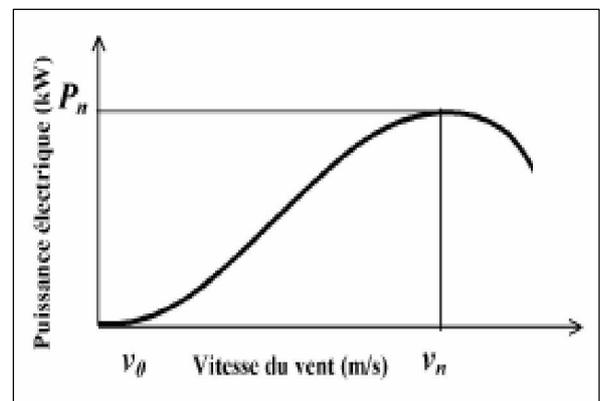


Fig. (II.6) : Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique)

ü Les éoliennes à pales orientables :

L’utilisation d’un système d’orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure à  $v_n$ . [11]

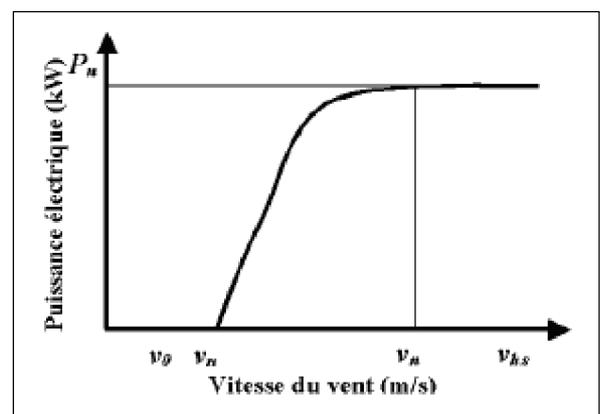


Fig. (II.7) : Génération à puissance électrique constante (pâles orientables).

- Avec : –  $v_f$ , la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.
- $v_{hs}$ , la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

c. Les éoliennes à vitesse variable :

ü Eolienne à vitesse variable à machine asynchrone à cage d'écurueil : [11]

Ce type d'éolienne permet de couvrir une plage de vitesse allant d'une très basse vitesse à la vitesse maximale grâce à un onduleur MLI reliée à un bus continu (fig.II.8). Le bus continu est relié au réseau alternatif par un second convertisseur MLI qui permet de contrôler les échanges de puissance active et réactive avec le réseau selon le schéma ci-après.

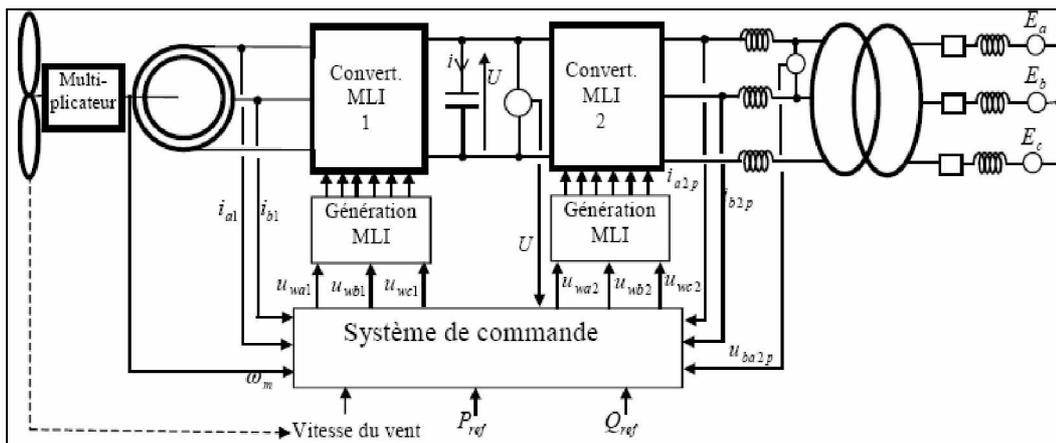


Figure (II.8) : Générateur éolien à vitesse variable basé sur une machine asynchrone à cage.

§ Éolienne commandée par le stator :

Présentation du modèle complet. Le développement du modèle complet de la chaîne de conversion éolienne commandée par le stator a déjà fait l'objet de travaux [11] et le modèle est donc par conséquent connu. Pour cette raison, nous ne détaillerons pas ici le modèle de cette chaîne dont l'architecture est présentée à la figure (II.9).

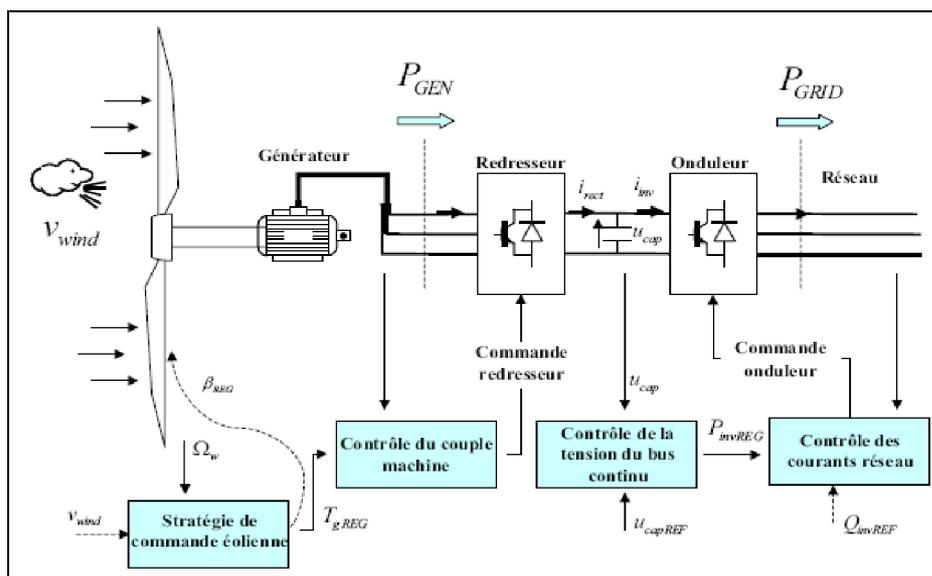


Fig. (II.9) : Architecture de la chaîne de conversion éolienne commandée par le stator.

ü Eolienne à vitesse variable à machine asynchrone à double alimentation :

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1MW reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au

réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion ou est injectée cette génératrice. [12]

La modélisation de ce système de génération éolien a été réalisée. Pour cette technologie d'éolienne, trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées (figure.(II.10)) [11].

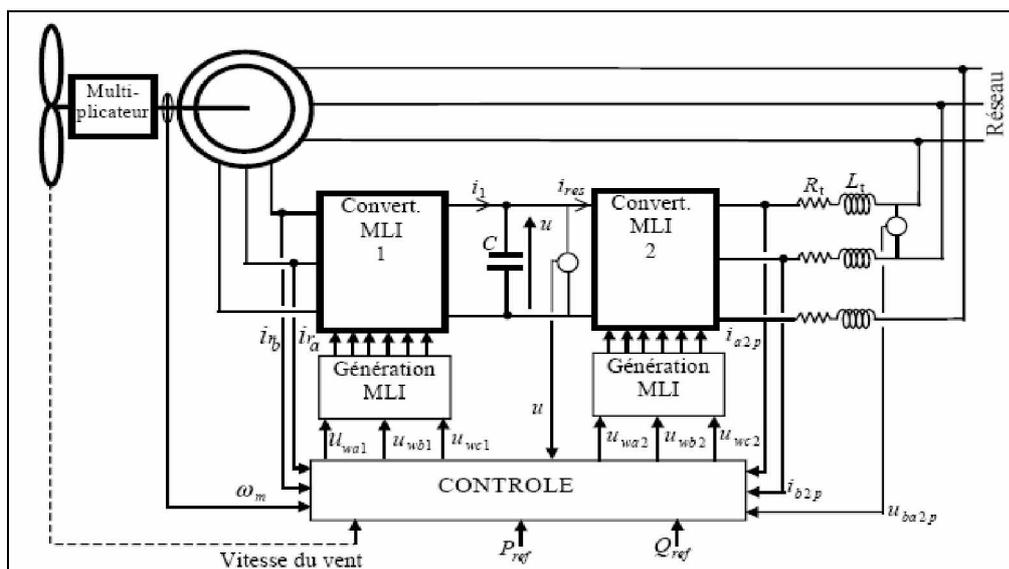


Figure (II.10) : Machine Asynchrone à Double Alimentation

\_ Double alimentation par le stator : \_ Double alimentation par le stator et le rotor : [12]

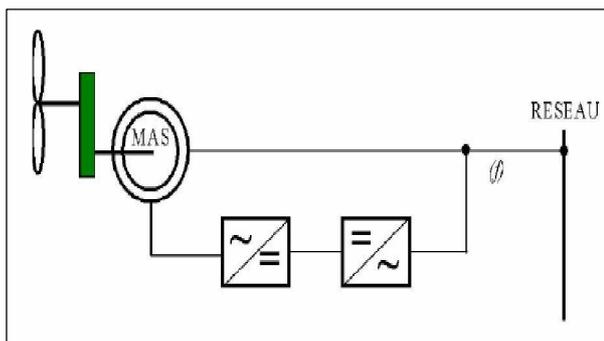


Fig. (II.11) : Machine asynchrone à double bobinage statorique

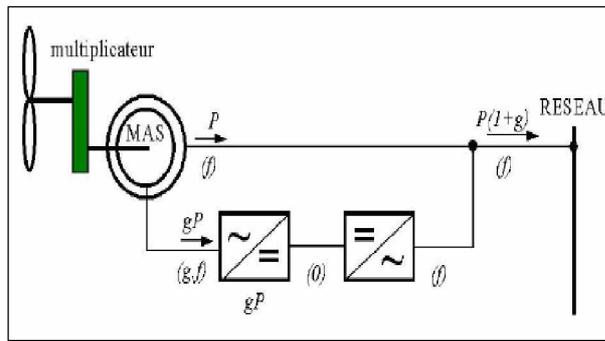


Fig. (II.12) : Machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

§ Éolienne commandée par le rotor : [13]

Le modèle complet de cette chaîne de conversion éolienne a déjà fait l'objet de nombreux articles. C'est pourquoi nous ne détaillerons pas ici le modèle complet de la machine et de son contrôle vectoriel. De plus, il est possible de modéliser l'électronique de puissance au rotor en utilisant le même principe que pour l'éolienne commandée au stator. Le schéma d'ensemble de l'éolienne commandée au rotor est présenté à la figure (II.13).

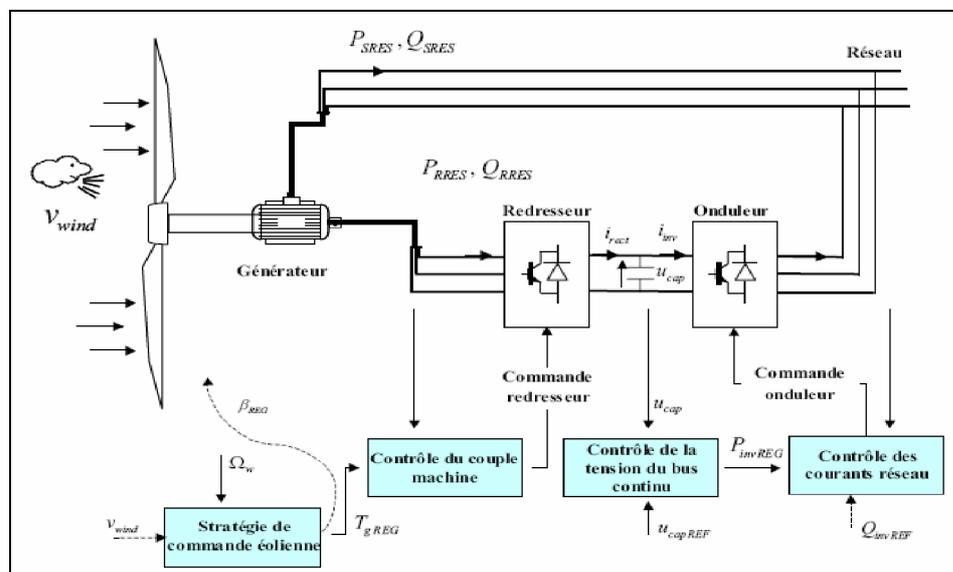


Figure (II.13) : Architecture de la chaîne de conversion éolienne commandée par le rotor.

### II.3.1.c. 2. Générateurs photovoltaïques :

La conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, soit « L'effet photovoltaïque » été découvert par le physicien français Becquerel en 1839. Cette conversion est assurée par les «cellules photovoltaïques » (PV) qui sont composées de silicium (cellules semi-conductrices P-N), basées sur l'effet photoélectrique. Quand la radiation solaire tombe sur la zone de semi-conducteur P-N, on parvient à générer une différence de potentiel et un flux de courant. Le courant de sortie dépend de la radiation solaire, de la température, de la vitesse du vent et des caractéristiques de chaque cellule photovoltaïque, avec un rendement de 100 W/m<sup>2</sup> (en 1999). [14]

Il est à noter qu'en dépit de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans une cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif. La cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Elle possède des caractéristiques électriques non linéaires dépendant de l'éclairement. [14]

Actuellement, le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique est encore faible (souvent inférieur à 12 %), 10 m<sup>2</sup> de panneaux PV sont nécessaires pour fournir 1 kW crête. Ce qui induit un coût élevé du watt crête.

Ce rendement faible ainsi que le coût élevé de la source photovoltaïque ont incités les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV. Ce maximum est généralement obtenu en assurant une bonne adaptation entre le générateur PV et le récepteur associé. Cette adaptation est effectuée à l'aide de convertisseurs statiques contrôlés pour différents modes de fonctionnement. [15]

Pour obtenir des courants et des tensions désirés, les cellules photovoltaïques sont regroupées en modules. De même, un panneau photovoltaïque est formé par plusieurs modules connectés en parallèle ou en série entre eux pour arriver à la puissance désirée.

Un générateur photovoltaïque est une source de courant continu et par conséquent sa sortie doit être adaptée pour sa connexion à un réseau alternatif ou pour alimenter une charge AC.

On peut y parvenir en deux étapes avec un convertisseur DC/DC et un onduleur DC/AC (Figure II.14) ou en une seule étape avec un onduleur DC/AC. Dans les deux cas, les convertisseurs sont contrôlés pour travailler dans le point d'opération optimal, c'est-à-dire dans le point de génération de puissance maximale (MPPT, Maximum Power Point Tracking). [10]

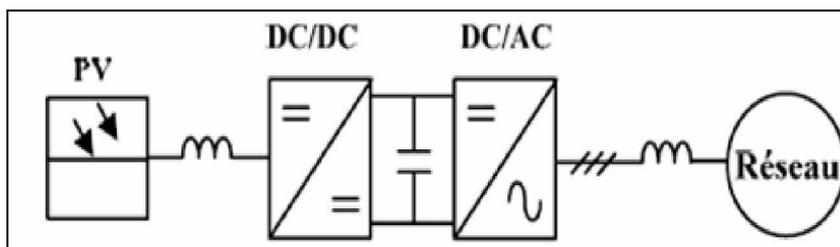


Figure (II.14) : Schéma bloc d'un générateur photovoltaïque.

- **Composantes d'une « centrale PV » :**

Un système photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif [15].

- **Les éléments :** [14]

- ü *Les modules PV :*

Le « module photovoltaïque » est composé de « cellules photovoltaïques » qui sont montées en série ou en parallèle. Le module fournit un courant électrique continu. Le montage en série est préférable au montage en parallèle car il augmente la tension du champ électrique (Volts) et génère moins de pertes en ligne. Un module est caractérisé par sa puissance nominale, appelée puissance crête ( $P_c$ ) qui s'exprime en watts (W). La  $P_c$  correspond à la puissance délivrée par le module dans des conditions spécifiques d'éclairement (un midi solaire en plein été) et de température ( $25^\circ$ ). Le module est soit superposé au bâti existant soit intégré à l'architecture où il prend part aux fonctions de clos et de couvert.

- ü *L'Onduleur :*

L'onduleur transforme le courant électrique continu produit par les cellules PV en courant électrique alternatif ; semblable à celui qui est délivré par le réseau. En cas d'absence ou de défaillance du réseau, l'onduleur se déconnecte automatiquement pour des raisons de sécurité : c'est la « protection de découplage » qui permet de supprimer tout risque d'électrocution lorsque des techniciens font une opération de maintenance sur le réseau, la puissance crête des modules ne doit jamais être inférieure à la puissance de l'onduleur,

- ü *Les organes de sécurité et de raccordement :*

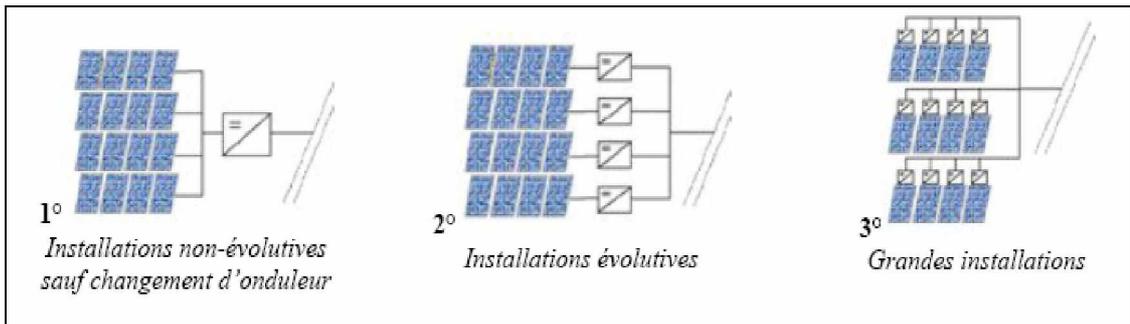
Ils assurent des fonctions de protection vis à vis de l'utilisateur et du réseau. Ceux-ci peuvent être intégrés dans l'onduleur.

○ **L'association des éléments :**

1° Un système centralisé : un seul onduleur dimensionné en fonction de la puissance totale des modules

2° Un système modulaire : plusieurs onduleurs reliés à une série de modules (option la plus adaptée aux petites installations)

3° Un système avec « panneaux alternatifs » : un petit onduleur pour chaque module (en substitution au boîtier de connexion)



• **Schéma d'une cellule élémentaire :** [15]

Les cellules les plus répandues actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel 0,6 V). Le rendement des modules en fonction des différentes technologies fait apparaître des écarts importants.

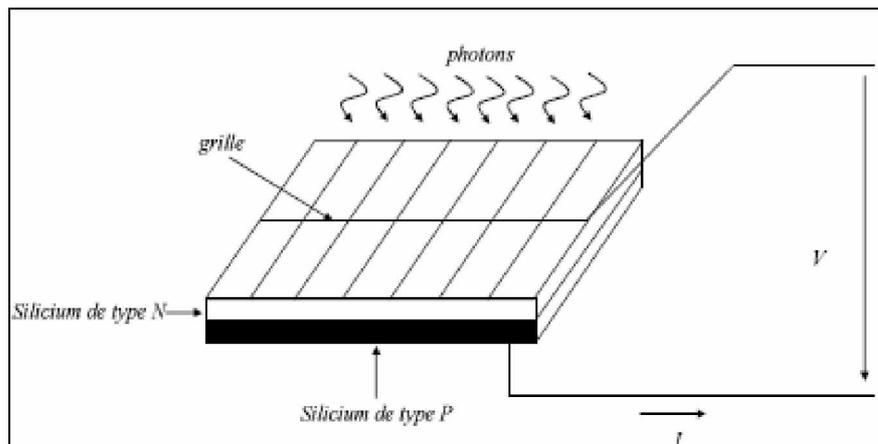


Fig. (II.15) : Schéma d'une cellule élémentaire

Une photopile fonctionne comme un générateur de courant dont la tension de fonctionnement dépend du courant absorbé par la charge qui lui est appliquée. Ces pertes de puissance électrique parviennent au niveau d'une cellule photovoltaïque et diminuent ainsi considérablement le rendement. Parmi les causes de ces pertes, on peut citer :

- \_ La réflexion de la lumière sur la face avant de la photopile (40 % pour le Si poli, peut être réduit par des traitements appropriés).
- \_ Le courant réel est inférieur au courant idéal à cause de la recombinaison des paires électron-trou sur les défauts (en particulier sur les impuretés) et des courants de fuite.
- \_ Facteur de forme (ou facteur de courbe) dû aux courants de diffusion et de recombinaison à travers la jonction.
- \_ Résistances série et shunt entraînant des pertes par effet joule.

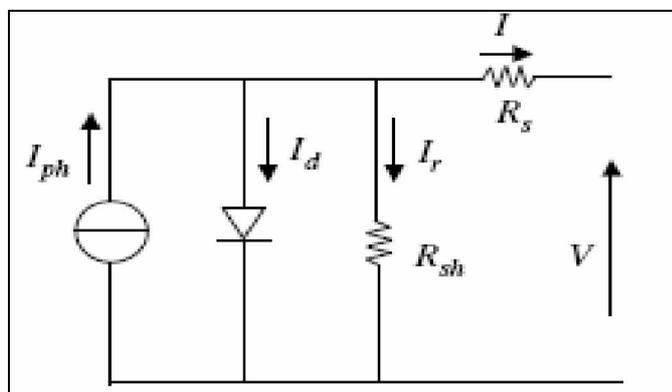


Fig. (II.16) \_ Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

### Ø Caractéristiques électriques des photopiles : [15]

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série  $R_s$  et shunt  $R_{sh}$  comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure (II.16). La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière.

La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction (surtout si elle est profonde), lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule. Le courant photopile a pour expression :  $I = I_{ph} - I_d - I_r$

(II.1) Avec:  $I_{ph} = I_{sc} \left( \frac{\Psi}{1000} \right)$  : Photo-courant de cellule, proportionnel à l'éclairement  $\Psi$ . Ce courant correspond également au courant de court-circuit.

$I_d = I_0 \left( e^{\frac{q(V+R_s I)}{nkT}} - 1 \right)$  : est le courant traversant la diode. On peut faire apparaître le potentiel

thermodynamique :  $V_T = (nkT) / q$ .

\_  $I_0$  : courant de saturation inverse de la diode

\_  $q$  : charge de l'électron  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C

\_  $k$  : constante de Boltzman  $1,38 \cdot 10^{-23}$  j/K

\_  $n$  : facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique.

\_  $T$  : température de la jonction en K

\_  $I_r = \frac{V + R_s I}{R_{sh}}$  : est le courant dérivé par la résistance shunt.

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant-tension.

$$I = I_{sc} \left( \frac{\Psi}{1000} \right) - I_0 \left( e^{\frac{(V+R_s I)}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (II.2)$$

✚ Paramètres externes :

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes I(V), ou de l'équation caractéristique.

Û *Courant de court-circuit* : C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal ( $R_s$  nulle,  $R_{sh}$  infinie) ce courant se confond avec le Photo-courant  $I_{ph}$ . Dans le cas contraire, en annulant la tension  $V$  dans l'équation (II.2), on obtient :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{(R_s I_{CC})}{V_T}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{CC}}{R_{sh}} \quad (II.3)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_0 \left( e^{\frac{(R_s I_{CC})}{V_T}} - 1 \right)$  devant  $I_{ph}$ . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{CC} \cong \frac{I_{ph}}{\left( 1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (II.4)$$

Pour le silicium  $I_{CC} = 30 \text{mA/cm}^2$  pour un éclairement maximal.

Û *Tension de circuit ouvert* : C'est la tension  $V_{CO}$  pour laquelle le courant débité par le générateur PV est nul (la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur PV). Son expression est déduite de l'équation suivante :

$$0 = I_{ph} - I_0 \left( e^{\frac{V_{CO}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{CO}}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{CO} = V_T \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (II.6)$$

Pour une photopile en silicium la tension de circuit ouvert  $V_{CO}$  est de 0,55 à 0,6V.

Û *Puissance optimale et facteur de forme* : La puissance utile maximale  $P_M = V_M I_M$ ,

s'obtient en optimisant le produit courant-tension, soit :  $\frac{I_M}{V_M} = - \left( \frac{dI}{dV} \right)_M$  (II.7)

Quant au facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, ou fill

factor, il est défini par :  $FF = \left( \frac{V_M I_M}{V_{CO} I_{CC}} \right)$  (II.8)

Û *Le rendement* : La puissance  $P = I.V$  est nulle en court-circuit et en circuit ouvert. Elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique I(V). Ce maximum  $P_m$  peut être déterminé en portant sur le même graphique la caractéristique I(V) et les hyperboles de puissance constante. Le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangence des deux courbes.

Le rendement est :  $n = \frac{P_M}{P_0}$

$P_0$  est la puissance incidente. Elle est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Pour le silicium le rendement est inférieur à 14%. La droite passant par l'origine et le point de puissance maximale a une pente qui correspond à la charge optimale de la photopile comme le montre la figure (II.19).

- **Association des photopiles : Générateur solaire :** [15]

Pour appliquer les caractéristiques courant tension d'un groupement de cellules qui sera en tout point homothétique de la courbe  $I = f(V)$  d'une seule cellule PV caractéristique, quelques hypothèses sont nécessaires:

- \_ Tous les panneaux ont les mêmes caractéristiques électriques.
- \_ Aucune occultation partielle. \_ Aucune influence thermique.

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série de  $\beta$  cellules et  $\alpha$  en parallèle est la suivante :

$$I = \alpha I_{SC} \left( \frac{\Psi}{1000} \right) - \alpha I_0 \left( e^{\frac{q \left( \beta V + \frac{\beta R_S I}{\alpha} \right)}{\beta n k T}} - 1 \right) - \frac{\beta V + \frac{\beta R_S I}{\alpha}}{\frac{\beta R_{Sh}}{\alpha}} \quad (\text{II.9})$$

La courbe de puissance d'un groupement série-parallèle est donc analogue à la courbe de puissance d'une cellule élémentaire. Ainsi tout ce qui a été dit pour une cellule élémentaire, concernant son comportement en fonction du flux lumineux et de la température ou l'influence des résistances série et shunt, ou concernant son interaction avec la charge est directement transposable au cas du groupement.

Le groupement de photopiles cité ci-dessus obéit à des règles strictes à respecter :

- \_ Il ne faut connecter en série que des cellules ayant le même courant de court-circuit  $I_{ph}$ .
  - \_ Il ne faut connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit ouvert  $V_{co}$ .
- Si les paramètres électriques des photopiles associées sont dispersés et si les règles précédentes ne sont pas respectées, certaines de ces photopiles vont se comporter en récepteur, en polarisation directe ou inverse. Elle entraîne une élévation de la température de ces photopiles et peut entraîner la détérioration du module entier. Pour éviter ce problème, on procède souvent à :
- \_ Un tri de cellules avant l'encapsulation des modules PV.
  - \_ Un emplacement des modules PV évitant les masques naturels ou artificiels provoquant de l'ombre.
  - \_ Une protection du réseau PV par l'association de diodes.

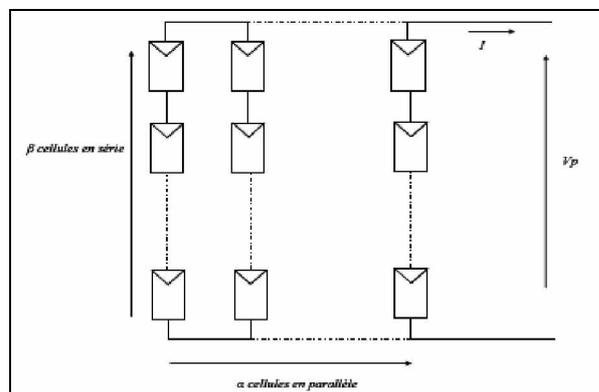


Fig. (II.17) : Association de  $\alpha$  cellules en parallèle et  $\beta$  en série.

- **Chaîne de conversion électrique** : [9]

Dans le cas d'installations autonomes, l'énergie produite par les panneaux solaires photovoltaïques est utilisée immédiatement (pompage, ventilation, etc....) ou stockée dans des batteries pour une utilisation différée. Le courant continu produit alimente directement des appareils prévus à cet effet ou est transformé en 230 Volts alternatif.

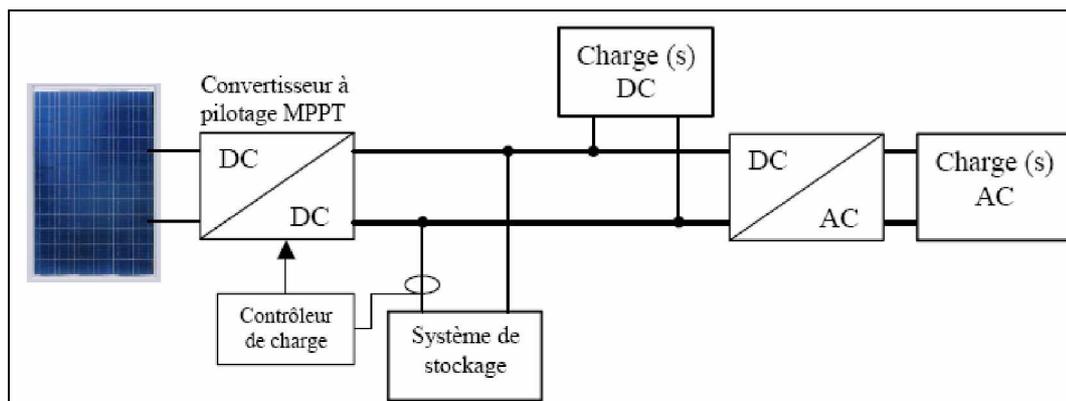


Figure (II.18) : Installation photovoltaïque autonome (un aérogénérateur et son convertisseur pourraient remplacer ou compléter le générateur photovoltaïque).

Le système peut également être connecté au réseau. L'avantage du raccordement est de se dispenser du coûteux et problématique stockage de l'électricité. Dans ses versions les plus économiques l'onduleur ne peut fonctionner qu'en présence du réseau, une éventuelle panne de ce dernier rend inopérant le système de production d'origine renouvelable. Un onduleur réversible est nécessaire si on a une charge à courant continu. Si la consommation locale est supérieure à la production de la centrale, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs voisins.

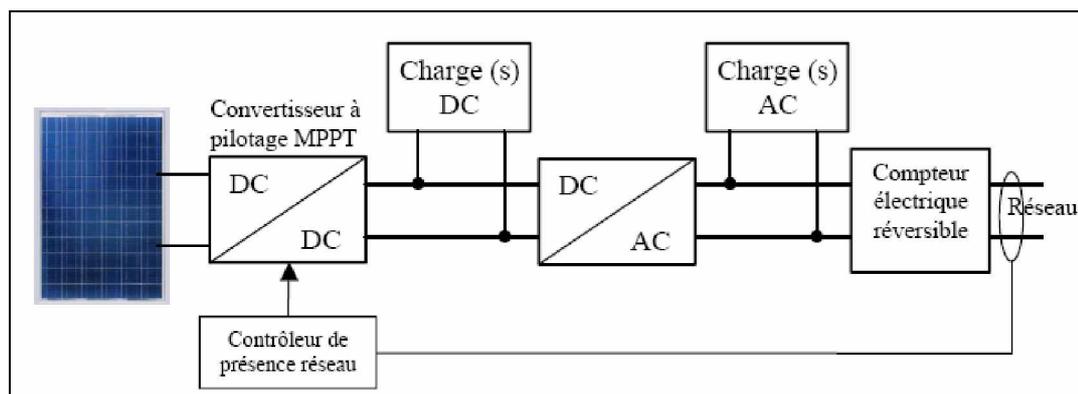


Figure (II.19) : Installation photovoltaïque couplée au réseau (un aérogénérateur et son convertisseur pourraient remplacer ou compléter le générateur photovoltaïque).

- **Les différents types de systèmes photovoltaïques** : [15]

Il existe deux types de structures de système photovoltaïque.

\_ Les systèmes à connexion directe au réseau Cette installation est constituée d'un générateur photovoltaïque qui est connecté à l'aide d'un onduleur au réseau électrique. Il existe dans la littérature de nombreux exemples.

\_ Le système à bus continu intermédiaire. Le générateur photovoltaïque est connecté à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-continu. Un onduleur délivre une tension modulée.

Celle-ci est filtrée pour réduire le taux d'harmonique (THD) On obtient alors en sortie de ce dispositif une tension utilisable pouvant être injectée dans le réseau. Il existe plusieurs architectures pour les dispositifs permettant de convertir la tension continue issue du générateur photovoltaïque en une tension sinusoïdale utilisable (230 V).

✚ *Système PV connecté directement au réseau :*

Cette structure est la plus basique et ne nécessite qu'un onduleur. Néanmoins, quelques adaptations sont nécessaires pour assurer un bon fonctionnement du système. Il est impératif de mettre en série un nombre suffisant de panneaux solaires pour avoir la tension adéquate au niveau du bus continu pour permettre le fonctionnement de l'onduleur. La tension aux bornes de ces panneaux ne va varier que très peu; la tension qui permet d'extraire le maximum de puissance pour différents éclaircissements se situe dans une plage réduite. Cette plage ne pouvant être dépassée pour le fonctionnement de l'ensemble.

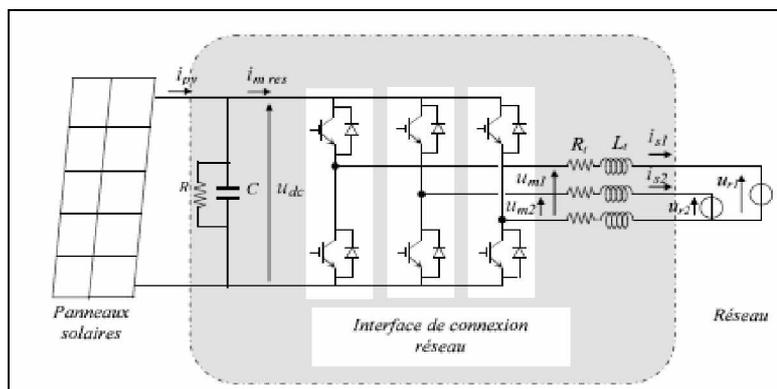


Fig. (II.20) : Système photovoltaïque à connexion directe.

*\_Structure à convertisseur unique :* [15]

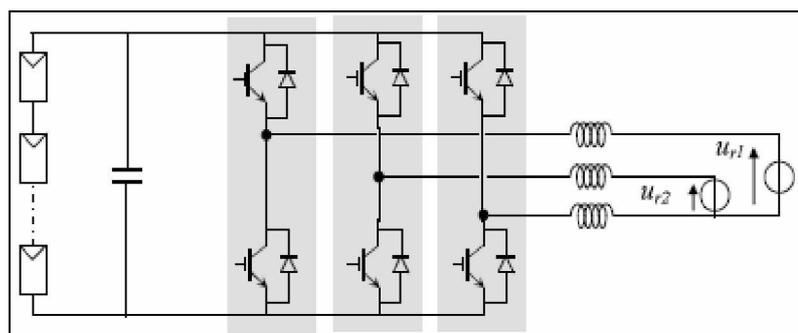


Fig. (II.21) : Plusieurs modules PV en série vers un seul onduleur.

*\_Structure avec bus à basse tension alternative :* [15]

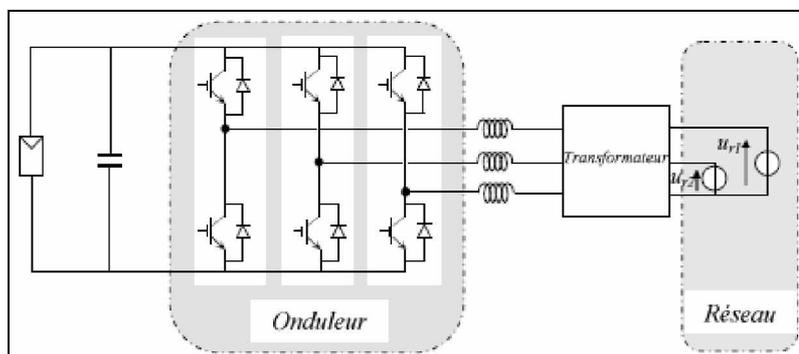


Fig. (II.22) : Bus à moyen tension alternative.

☀️ *Système a bus continu intermédiaire* : [15]

*\_Structure à deux convertisseurs :*

Cette structure apparaît comme la plus simple des structures avec étage continu. Ce système photovoltaïque représenté à la figure (II.23) comporte des panneaux solaires connectés en série et en parallèle, un hacheur survolteur, un bus continu et un onduleur de tension. Les panneaux solaires fournissent un courant dépendant de l'éclairement et de la tension à leurs bornes. Un adaptateur d'impédance permettant d'extraire le maximum de puissance des panneaux solaires. La connexion au réseau permettant le transit de puissance vers le réseau. Le réseau moyen tension permettant la distribution de la puissance.

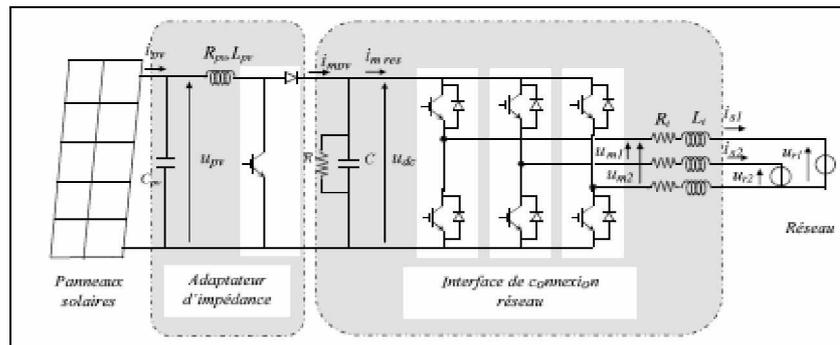


Fig. (II.23) : Système photovoltaïque à deux convertisseurs.

*-Structure avec hacheur et onduleur :*

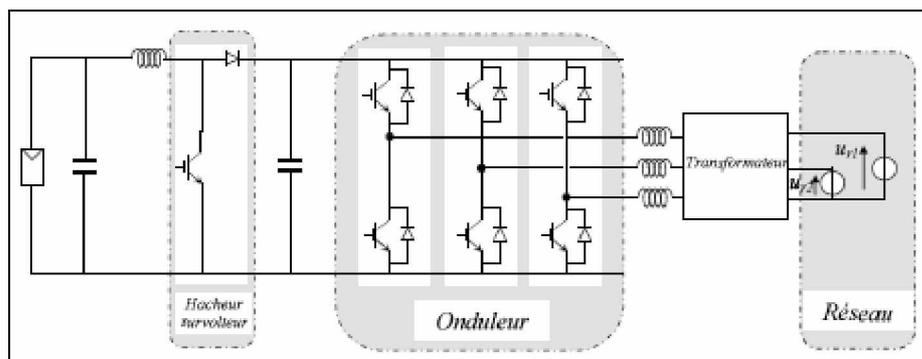


Fig. (II.24) : Hacheur élévateur de tension avec onduleur centralisé.

*\_Structure avec convertisseur forward :*

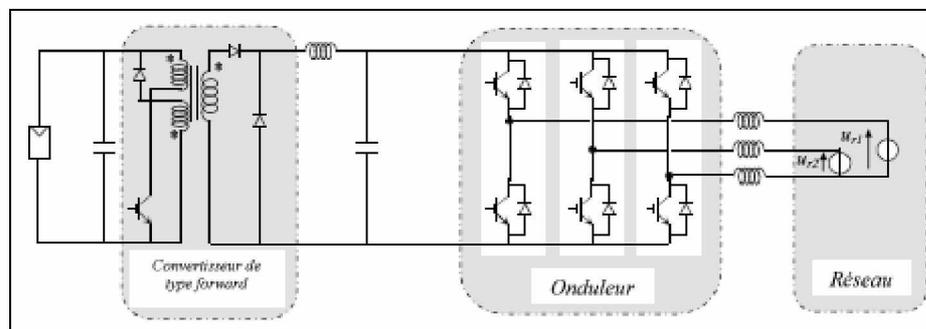


Fig. (II.25) : Convertisseur de type forward alimentant le bus continu.

\_Structure avec un convertisseur de type fly-back :

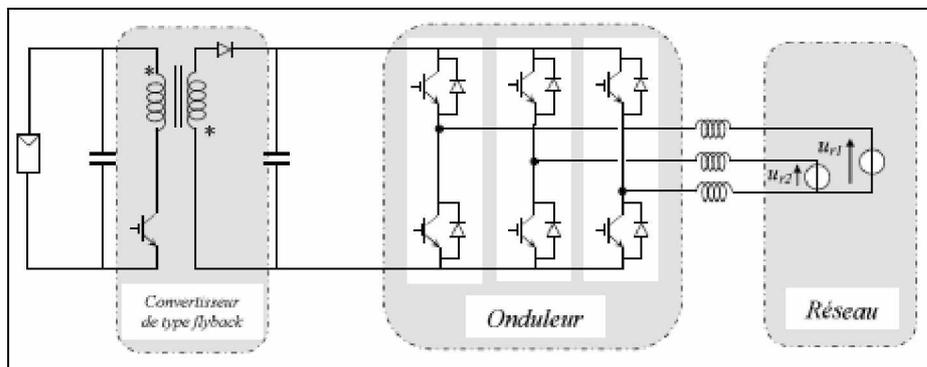


Fig. (II.26) : Structure avec un convertisseur de type fly-back.

- **Paramètres qui influencent la quantité d'énergie produite** : [14]

*\_Le gisement solaire* : La quantité de kWh produite est directement proportionnelle au gisement solaire propre à une zone géographique et de façon plus fine aux variations saisonnières qui modifient les moyennes mensuelles.

*\_L'orientation et l'inclinaison* : Plein sud de préférence, l'exposition sud-est ou sud-ouest donne des résultats satisfaisants.

*\_Les masques* : - Une ombre, même partielle, affecte la production entière d'un module ; aussi faut-il accorder un soin particulier à cette question. L'installateur doit réaliser une « étude de masque » afin de mesurer avec précision les pertes de rendement. Ces ombres sont projetées par les obstacles (végétation, reliefs montagneux, habitations voisines, câbles du réseau électrique et/ou de téléphone) entre la course du soleil et le plan d'inclinaison du module.

## II.4. Intégration de la GED sur les réseaux de distribution :

### II.4.1. Généralités :

Le raccordement aux réseaux de distribution (MT) d'unités de production décentralisées doit respecter certaines contraintes techniques et impose généralement des aménagements dans le réseau pour assurer un fonctionnement correct de ce dernier, en particulier dans les réseaux de distribution qui n'ont pas été à l'origine conçus et développés pour accueillir des unités de production. Des précautions quant à l'insertion de GED sur les départs de réseaux de distribution sont ainsi à prévoir par des règles de raccordement afin de conserver le bon déroulement du fonctionnement du réseau. Ces règles sont des prescriptions techniques de conception et de fonctionnement : la protection, la puissance d'installation, la perturbation et la fréquence, tension.... [3]

Ces règles, actuellement en vigueur, sont prévues pour garantir le bon fonctionnement du réseau de distribution tel qu'il est actuellement. Si les réseaux de distribution évoluent vers d'autres architectures et d'autres modes d'exploitation, ces règles sont susceptibles d'être modifiées. [3]

Le concept actuel des réseaux de distribution n'étant pas adapté à la production décentralisée, l'augmentation, dans l'avenir, de ce type de production laisse penser que des modifications de l'architecture de la distribution pourraient être avantageuses dans la mesure où une structure plus adaptée pourrait permettre une meilleure exploitation de ces unités de production pour le fonctionnement du réseau :

- Une topologie comportant des boucles fermées.
- L'utilisation des GED en tant que secours ou soutien du poste source.

Ces mesures pourraient améliorer la fiabilité du réseau de distribution. Mais il faut considérer les coûts de ces innovations et la rentabilité d'un tel système. [3]

Le raccordement d'un utilisateur doit être étudié de façon à identifier une solution répondant strictement au besoin de raccordement du demandeur tout en garantissant que ce raccordement n'aura pas de conséquence sur le fonctionnement du réseau et sur la qualité de l'énergie fournie aux autres utilisateurs déjà raccordés. [16]

L'instruction des demandes de raccordement suppose la collecte de différentes caractéristiques de l'installation permettant de conduire les études techniques de raccordement. Ces fiches de collecte, et la procédure d'instruction des demandes de raccordement sont publiées.

La solution de raccordement s'inscrit dans la structure de réseau existante ou décidée pour la zone concernée et utilise les ouvrages de distribution existants ou à créer présentant la capacité d'accueil suffisante. [16]

#### **II.4.2. Étude de raccordement d'une installation : [16]**

Les différentes étapes de l'étude de raccordement ont pour objet de concourir à la détermination des ouvrages à établir ou à modifier pour assurer une desserte dans des conditions techniques et économiques optimales. Chacun des domaines d'interaction du site avec le réseau ou les autres utilisateurs est exploré et le dimensionnement du raccordement projeté doit assurer le maintien du réseau existant et futur dans un domaine de fonctionnement acceptable.

Les vérifications à mener pour vérifier l'impact du raccordement et déterminer les solutions de raccordement de tous les utilisateurs producteur ou consommateur sont les suivantes :

- Tenue thermique des éléments du réseau : vérification des capacités de transit,
- Vérification des conséquences sur les plans de tension des réseaux HTA et BT.

Pour les utilisateurs producteurs, les vérifications complémentaires suivantes sont à effectuer :

- Vérification de la tenue de la tension au poste source : risque de butée régleur,
- Modification des comptages au poste source,
- Vérification de la tenue des matériels aux courants de court-circuit supplémentaires apportés par l'installation de production,
- Vérification du fonctionnement du plan de protection contre les défauts entre phases du réseau HTA et du poste de livraison,
- Choix de la protection de découplage,
- Évaluation de la nécessité d'installation d'un dispositif d'échange d'informations d'exploitation.

Certaines installations de consommation ou de production particulières peuvent nécessiter des études complémentaires compte tenu de leur impact possible sur la qualité. Ces études ne sont pas systématiques et sont engagées selon la nature et les caractéristiques de l'installation (en soutirage ou en injection) envisagée et les caractéristiques du réseau d'accueil :

- Évaluation du niveau de variations rapides de tension,
- Évaluation des niveaux de courants harmoniques injectés,
- Évaluation du déséquilibre des charges,
- Évaluation de l'affaiblissement du signal de transmission tarifaire.

#### **II.4.3. Domaine d'application : [17]**

Ces prescriptions techniques s'appliquent aux installations de production d'énergie électrique à raccorder sur les réseaux de distribution à basse tension ou à moyenne tension, couvrant la gamme des puissances allant jusqu'à plus ou moins 25 MVA.

#### II.4.4. Raccordement : [17]

En fonction de la puissance à raccorder, des caractéristiques du réseau sur lequel elle est appelée à être raccordée et du maintien d'une qualité de tension dans les limites fixées par la norme EN 50160, le gestionnaire du réseau établit les dispositions du raccordement. Le réseau qui doit assurer le transit de la production décentralisée est soumis à plusieurs contraintes.

- Il doit pouvoir maintenir le plan de tension dans les limites d'exploitation avec et sans la présence de la production décentralisée.
- La puissance totale des productions décentralisées ne doit pas dépasser la puissance des transformateurs HT/MT en situation n-1 du réseau.

Note 1 : La situation n est la situation du réseau sans élément défectueux, la situation n-1 est la situation avec 1 élément de réseau défectueux.

Note 2 : On peut décider de commun accord qu'il est prévu que certaines productions décentralisées ne fonctionnent pas en situation n-1 du réseau.

- De même dans un réseau BT la puissance totale des productions décentralisées ne doit pas dépasser la puissance du transformateur MT/BT.
- De plus le transit de la puissance doit se faire sans excéder la capacité des éléments du réseau.
- Enfin le supplément de puissance de court-circuit cumulé à la valeur de la puissance de court-circuit du réseau doit être compatible avec le niveau réel du matériel. En conséquence le raccordement peut nécessiter des renforcements du réseau et de ce fait, une participation financière du producteur décentralisé dans ces renforcements peut être demandée.

Sur base de ces critères, le gestionnaire du réseau fixe le mode de raccordement de l'installation de production au réseau de distribution. Chaque cas fait l'objet d'un examen particulier qui tient compte des conditions réelles rencontrées.

#### II.4.5. Couplage : [17]

L'opération de couplage du système de production sur le réseau dépend du type d'interface utilisé.

Une mise en parallèle de l'installation de production décentralisée avec le réseau public de distribution est toujours réalisée moyennant un relais synchrocheck équipé d'un synchronoscope. Ce dispositif est de type agréé par le gestionnaire du réseau. Pour des installations avec une puissance  $\leq 10$  kW, ce relais peut être omis.

Lors de la prise de parallèle, la tension, la fréquence et l'écart de phase sont tels qu'ils ne provoquent pas de variations brusques relatives de la tension supérieures à 6 %.

Si la prise de parallèle se répète plusieurs fois par jour, les variations brusques de tension dues aux prises de parallèle seront limitées aux mêmes valeurs que celles requises pour le fonctionnement et définies dans le paragraphe suivant.

Pendant le fonctionnement, les variations brusques de la tension seront limitées en valeur relative à 3 % au maximum et en fonction de leur fréquence d'apparition à des valeurs inférieures de façon à ne pas perturber les autres utilisateurs raccordés au réseau. Elles ne pourront engendrer dans le réseau de distribution la gêne due au phénomène de flicker.

Ces considérations impliquent que la production décentralisée qui fonctionne en îlotage ne peut être recouplée au réseau qu'après vérification de la tension, de la fréquence et de l'écart de phase et qu'il ne peut pas être possible d'effectuer une prise de parallèle à un endroit non prévu, des verrouillages sont installés pour empêcher ces éventualités.

Après un déclenchement commandé par la protection de découplage, lorsque les conditions sont redevenues normales, le recouplage au réseau peut se faire automatiquement à condition de disposer d'un système de synchronisation automatique.

### III. CONCLUSION :

Ce chapitre expose une vision sur la production décentralisée ainsi que ses intérêts qui justifient le développement de ce type de production, parmi lesquelles nous relevons les suivantes:

- La production d'énergie plus près des consommateurs permet de réduire les pertes dans les lignes.
- La substitution de l'énergie conventionnelle « polluante » (produite par les grandes centrales nucléaires et thermiques) par des énergies nouvelles « propres ».
- Un intérêt économique très important pour les exploitants de GED grâce aux subventions accordées (actuellement dans certains pays producteurs de ce type d'énergie).
- En matière de planification, face à une augmentation de la charge, l'insertion de GED sur le réseau de distribution permet d'éviter la construction de nouvelles lignes HTB et ce, avec un temps d'étude et d'installation plus court. Pour l'alimentation de sites isolés, il peut encore être plus rentable d'alimenter un réseau de distribution local avec des GED plutôt que de relier le site à un poste HTB/HTA lointain.

Mais un certain nombre de problèmes nouveaux sont rencontrés, liés au fait que le réseau de distribution n'a pas été initialement conçu pour accueillir des unités de production d'électricité. La compromission de la passivité du réseau par ces unités peut poser un certain nombre de problèmes.

Il convient de distinguer clairement les problèmes locaux, liés à l'implantation d'une unité particulière, et ceux qui se manifesteront à plus long terme à un niveau global, dus à la forte pénétration de la production décentralisée sur le réseau.

Les premiers nécessitent le respect de certaines prescriptions techniques de branchement au réseau. Les seconds ne deviendront réellement préoccupants que si la production décentralisée connaît un développement important. Il appartient aux planificateurs de réseaux de réfléchir aux dispositions qui seront alors à prendre pour que la qualité de service électrique que nous connaissons aujourd'hui soit maintenue. Se posera alors le problème du financement des modifications et compléments d'équipements nécessaires, qui devra faire l'objet d'une discussion entre pouvoirs publics, désireux de promouvoir la production décentralisée pour des raisons environnementales notamment, et les gestionnaires de réseaux.

**Chapitre III :**

***Impact de la  
production  
décentralisée sur le  
réseau de distribution***



## I. INTRODUCTION

La tendance vers la dérégulation devient de plus en plus répandue dans le monde, notamment dans les pays développés. D'ailleurs, la préoccupation accordée à l'aspect environnemental et au développement durable a encouragé les producteurs à développer la production décentralisée d'électricité sur la base des énergies nouvelles et renouvelables et des solutions de à haut rendement énergétique. [24]

Ces évolutions sont les deux facteurs essentiels qui favorisent l'introduction des nombreux producteurs de taille petite ou moyenne aux réseaux électriques aux niveaux de tension inférieure au cours de ces dernières années. [2]

Ce nouveau phénomène peut être positif et négatif à la fois. D'une part, l'insertion des GED est présentée comme un facteur de renforcement des moyens de production du système. D'autre part, elles apportent également des impacts négatifs à échelle du système en le fragilisant notamment dans les situations critiques. [10]

Traditionnellement, le renforcement du système de production électrique se fait par l'insertion de nouvelles unités de production centralisée au réseau de transport.

Au cours de ces dernières années, la tendance de libéralisation du marché de l'électricité a favorisé l'apparition de nombreux producteurs dans les réseaux électriques de niveaux de tension inférieure.

On appelle ces nouveaux producteurs par plusieurs noms comme *Production Décentralisée*, *Production Distribuée*, *Génération d'Énergie Distribuée* ou *Génération d'Énergie Dispersée*, etc., pour définir les sources d'énergie électrique alternatives de la production centralisée qui sont placées près des points de consommation et disposées des puissances installée allant de moins de 1 kW à 50 MW. [15]

Le raccordement de production décentralisée aux réseaux de tension inférieure (par rapport au réseau de transport) apporte des intérêts économiques et énergétiques, mais il sera pénalisé sur le plan de l'exploitation du système.

Dans ce troisième chapitre on va situer les différents impacts de l'insertion de PDE sur le réseau de distribution où l'on s'intéresse plus à l'impact sur le plan de la tension, ensuite, dans la dernière partie, on prend en particulier l'effet de la production de type éolienne.

## II. impact de la production décentralisée sur le réseau 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. En particulier, le plan de tension peut être grandement modifié par la présence de GED, au point que la tension risque de dépasser la limite supérieure en certains noeuds du réseau alors qu'elle est maintenue à une valeur normale au poste source. Le plan de protection risque également d'être affecté 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 citées plus haut ajoutées aux risques d'oscillations de puissance active et leur corollaire qui est une stabilité dégradée. [1]

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 dispatchables 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. [1]

Une partie de ces GED produisant par construction du courant continu (pile a combustible, panneau solaire) doit être raccordée au réseau par l'intermédiaire d'interfaces d'électronique de puissance, injectant ainsi des harmoniques nuisibles a la qualité de la tension délivrée. Enfin, la présence de GED en aval d'un poste source dont le transformateur est équipé d'un régulateur en charge régulé par compoundage perturbe son fonctionnement base sur la mesure du courant absorbé. En effet, la production de puissance par les GED réduit le courant traversant le transformateur, provoquant une action du régulateur en charge et diminuant ainsi la tension au niveau du poste source. [1]

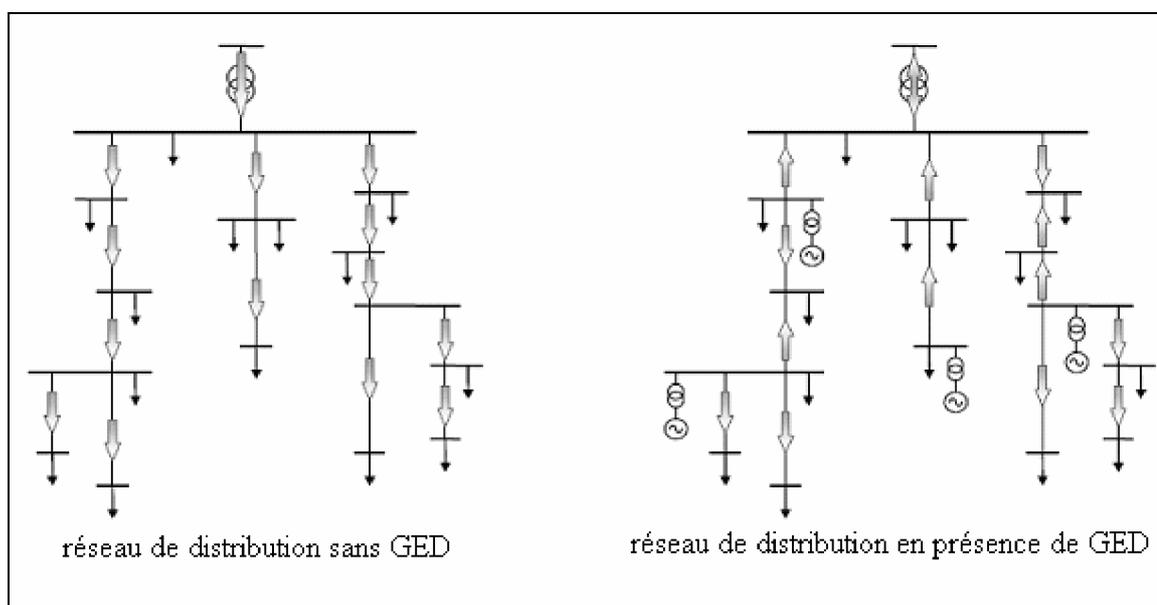


Figure III.1 : Flux d'énergie sur un réseau de distribution en présence de GED.

On trouve dans la littérature plusieurs études qui ont été faites afin d'identifier et d'évaluer les impacts de la production décentralisée sur le réseau, puis, de proposer des solutions adaptées. L'opérateur du réseau se préoccupe de ce type d'étude lors de la phase de planification ou de l'approbation d'un projet de raccordement des GED. Les principaux impacts à rappeler sont les suivants : [19]

### **II.1. Impacts sur le sens de transit de puissance :**

Les réseaux sont dimensionnés pour recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution. L'insertion des GED dans les niveaux de tension autres que le réseau de transport peut créer une injection de puissance dans le sens contraire, c'est-à-dire de la distribution vers le transport. Les équipements, notamment les protections doivent alors être bidirectionnels. Ainsi, sachant que les réseaux aux niveaux de tension inférieure sont normalement surdimensionnés afin de faire face à l'accroissement de consommation, on n'aura peut-être pas, à court terme, de problèmes liés à des limites de la capacité de transfert d'énergie ; mais à plus long terme, lorsque le taux de pénétration de GED augmentera, la modification du sens de transit de puissance pourra éventuellement provoquer des congestions locales. [19]

### **II.2. Impacts sur la stabilité du système :**

Les génératrices de productions décentralisées peuvent être de type synchrone ou asynchrone. L'insertion de générateurs synchrones dans le réseau va changer le temps critique d'élimination de défaut (correspondant à la durée maximale d'une perturbation à la quelle le système peut résister sans perte de stabilité). Ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système en considération. [19]

### **II.3. Impacts sur la qualité de service :**

Les GED de type asynchrone consomment de la puissance réactive afin de magnétiser leur circuit magnétique. Lors de la connexion au réseau, elles appellent un courant fort, ce qui contribue au creux de tension (en profondeur). D'ailleurs, la présence d'interfaces d'électronique de puissance peut faire augmenter le taux des harmoniques qui nuisent gravement à la qualité de service fournie. [19]

### **II.4. Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système :**

Les GED, notamment celles à type énergie nouvelle et renouvelable, sont caractérisées par l'intermittence des sources primaires. Cela sera difficile pour l'opérateur d'estimer la puissance de sortie de ces producteurs, donc la puissance fournie du système, par conséquent. [19]

### **II.5. Impacts sur la continuité de service :**

Pour la même raison concernant la caractéristique d'intermittence, l'indisponibilité des GED lors que le système les sollicite peut occasionner la rupture d'électricité par manque de puissance. [19]

### **II.6. Découplage des sources autoproductrices :**

Supposant à présent que le système de protection du distributeur fonctionne parfaitement, encore faut-il que celui de l'installation autoproductrice la découple lors de l'ouverture d'un disjoncteur de réseau situé en amont. Si les petits moteurs ralentissent rapidement après

l'ouverture d'un départ, les générateurs conservent eux plus longtemps leur vitesse. La mise hors tension d'un réseau comportant des générateurs n'est donc plus assurée par l'ouverture d'un disjoncteur. La tension peut en effet subsister pendant plusieurs secondes, voire davantage, si un équilibre s'établit entre les puissances disponible et consommée. On dira alors qu'il y a 'flotage'.

Même s'il s'avère peu probable que de telles conditions d'équilibre soient remplies, la possibilité d'une telle situation est inacceptable pour l'exploitant de réseau, pour des raisons de sécurité. L'apparition intempestive d'une tension sur le réseau, due au démarrage d'une génératrice, est évidemment elle aussi à proscrire absolument. Le personnel technique doit en effet pouvoir intervenir au moment choisi et sans danger, après un ordre de mise hors tension du réseau. C'est le maintien de la sécurité qui conduit aux exigences les plus sévères en matière de dispositifs de couplage des autoproducteurs. [18]

Ainsi, afin de permettre les travaux sur le réseau, l'installation de production décentralisée doit pouvoir en être séparée par un dispositif de coupure de sécurité visible, verrouillable et accessible en permanence au gestionnaire de réseau. Si la tension n'est plus normale, la source autonome doit pouvoir être découplée automatiquement du réseau.

Il existe trois filières permettant d'assurer ce découplage : la télécommande, la protection fréquentielle et la connexion au réseau via un redresseur-onduleur piloté par le réseau. [18]

## **II.7. Impacts sur le plan de protection :**

La connexion de nouveaux générateurs au réseau modifiera également les courants de courts-circuits et donc le réglage des seuils des protections.

D'ailleurs, ce changement peut provoquer une mauvaise sélectivité, des déclenchements intempestifs ou l'aveuglement du système de protection. [19]

### **a. Courant de court-circuit :**

En matière de protection, il faut tenir compte de ce que les générateurs décentralisés contribuent à une augmentation du courant de court-circuit dans le réseau. Dans le cas de générateurs, directement raccordés au réseau, cette contribution est de l'ordre de 4 à 8 fois le courant nominal de la machine. Dans le cas d'un raccordement au travers d'un convertisseur électronique cette contribution peut être ramenée au courant nominal par contrôle rapide du convertisseur. Signalons toutefois qu'avec ce dernier système en cas de fonctionnement sur charge isolée du réseau suite à un incident, les protections par surintensité ne fonctionneraient pas pour éliminer un court-circuit dans le réseau. Ce problème pourrait systématiquement se rencontrer avec des systèmes photovoltaïques ou à piles à combustibles sur réseau isolé. Des précautions particulières sont à prévoir. [8]

### **b. Influence sur la sélectivité des protections :**

La sélectivité des protections peut être affectée par l'introduction d'unités de production décentralisée dans le réseau de distribution dont la structure est de type radial. Pour illustrer cette influence considérons le schéma de la figure (III.2) ci-après d'alimentation par une sous-station du réseau d'une charge par la liaison 2, et la connexion à la sous-station par la liaison 1 d'une unité de production décentralisée. Ces deux liaisons sont chacune protégées par un disjoncteur contre les surintensités comme c'est l'usage. [8]

Dans cet exemple extrêmement simple la protection de la ligne 1 déconnecte inutilement l'unité de production lors d'un défaut sur la ligne 2, car le courant du générateur lors de ce défaut est supérieur au seuil de protection en cas de défaut sur la ligne 2. Les seuils de protection doivent donc être revus pour que seule la ligne en défaut soit déconnectée. [8]

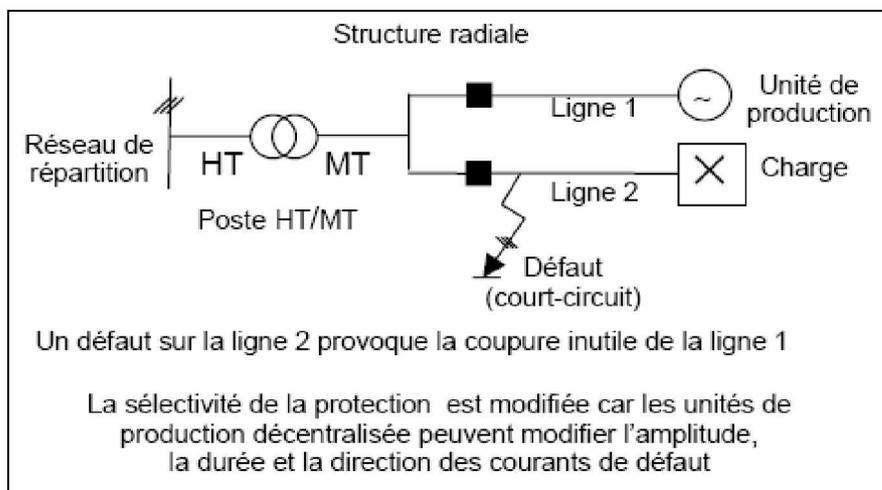


Figure (III.2) : Alimentation par une sous-station du réseau d'une charge par la liaison 2 et la connexion à la sous-station par la liaison 1 d'une unité de production décentralisée.

Pour toute implantation d'une unité de production décentralisée dans le réseau de distribution, il faut impérativement vérifier la sélectivité des protections et le cas échéant les ajuster. [8]

## II.8. impact sur La tenue de fréquence : [19]

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:

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

## II.9. Impacts sur la tenue de tension :

On sait que les noeuds proches d'une source ont une tension plus élevée, la tension diminuant au fur et à mesure que l'on s'en éloigne. La connexion de sources de GED à proximité des charges modifiera donc naturellement le profil de tension sur le réseau [19].

### II.9.1. rappel sur l'importance de la tenue de tension dans les réseaux électriques :

- *Pour la sécurité des réseaux* : [2]

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:

- 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 de transport, les limites inférieures de tension sont liées à 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.9.2. Mise en évidence des problèmes de tensions induits par l'insertion de PDE en HTA :

### II.9.2.1. Problème de génération en aval d'un transformateur régleur en charge :

La présence de PDE sur les réseaux HTA peut induire des problèmes de fonctionnement des régleurs en charge. En effet, ceux-ci n'étant pas dimensionnés pour avoir en aval de leur secondaire une production trop importante, cette configuration peut affecter leur vision de l'état de charge du réseau en particulier pour les régleurs en charge avec compundage. [7] a mis en évidence ce phénomène où la production par PDE en aval du transformateur réduit le flux de puissance transitant par celui-ci. Ainsi, le courant mesuré dans la résistance de compundage devient moins important de même que la chute de tension aux bornes de celle-ci. Pour le régleur en charge, ce nouveau transit est vu comme un état de charge faible, ce qui peut provoquer un changement de prise (diminution) dans le but de baisser la tension du transformateur. [7]

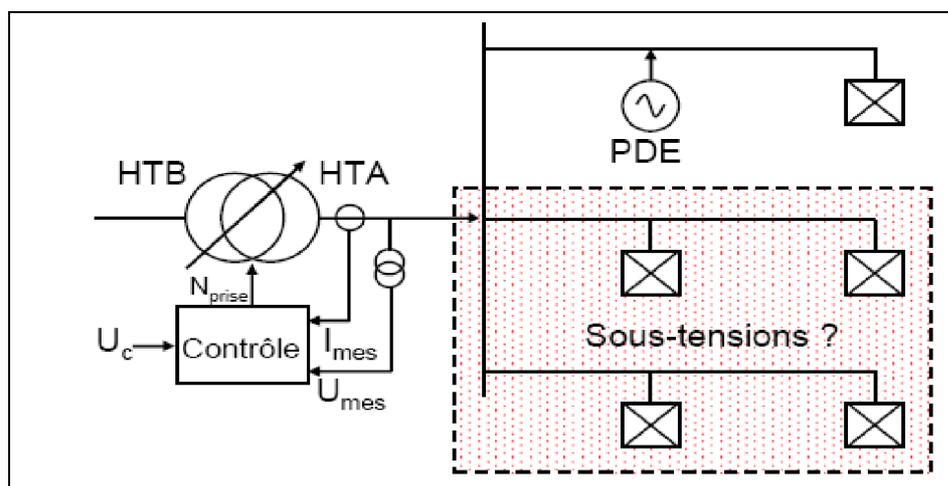


Figure (III.3): Configuration d'un réseau de distribution HTA pouvant être problématique.

Ce changement n'a pas d'impact négatif sur le départ où sont connectées les PDE puisque celles-ci tendent à augmenter la tension sur ce départ. Cependant cette configuration peut être critique pour les départs adjacents sans PDE qui peuvent voir apparaître des tensions trop basses. [8]

**II.9.2.2. Les surtensions induites par la connexion d'une PDE : [2]**

La principale problématique du producteur et du distributeur en charge du réseau électrique est la continuité du service ainsi que le respect des caractéristiques contractuelles en tension et en fréquence.

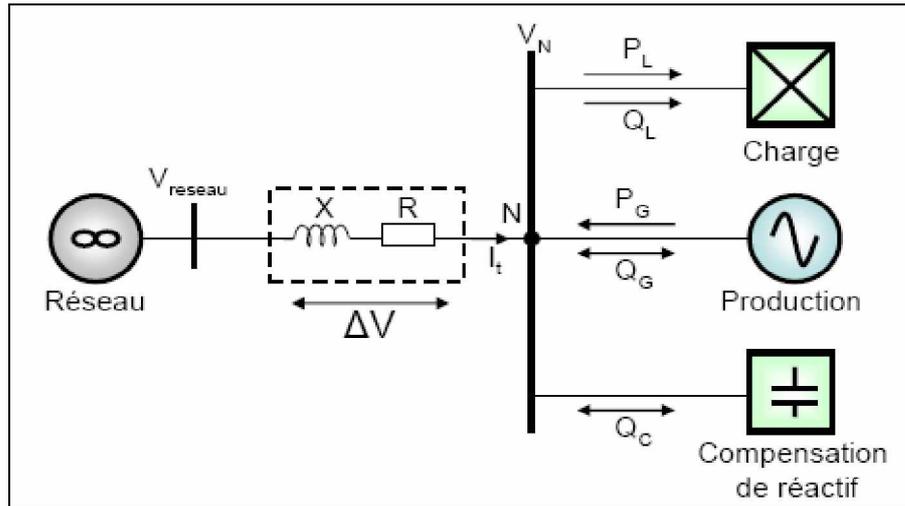


Figure (III.4) : Détermination de la chute de tension sur une ligne.

Dans le réseau de distribution classique de structure radiale, la tension est, en règle générale, plus élevée au poste source et diminue vers l'extrémité du départ. La puissance circule dans un sens à partir du poste source vers les consommations. Mais, avec la présence de PDE sur le réseau, le réseau devient actif et les transits de puissance sont modifiés. La chute de tension ( $\Delta V$  en pu) entre le poste source et le point de raccordement d'une PDE via une ligne {Figure (III.3)} est déterminée comme suit :

$$\Delta V = R \cdot I_t \cdot \cos \phi + L \omega \cdot I_t \cdot \sin \phi \dots\dots\dots(III-1)$$

Où : R, L : sont la résistance et l'inductance totale de la ligne.  
 VN : la tension au noeud N et I<sub>t</sub> le courant transitant dans la ligne.  
 PN, QN : les puissances active et réactive au noeud N.

$$\Delta V = R \cdot \frac{P_N}{V_N} + L \omega \cdot \frac{Q_N}{V_N} = \frac{R(P_G - P_L) + L \omega (\pm Q_G - Q_L \pm Q_C)}{V_N} \dots\dots\dots(III.2)$$

$$\Delta V = \frac{R \cdot P_N + X \cdot Q_N}{V_N} \dots\dots\dots(III.3)$$

PG, QG: sont les puissances active et réactive fournie par PDE.  
 PL, QL : sont les puissances active et réactive de consommation.  
 QC : est la puissance réactive du dispositif de compensation.

L'équation (III.3) illustre un des principaux problèmes liés à la connexion de PDE sur un réseau. En effet, l'injection de puissance, active ou réactive, va induire une élévation de la tension au noeud de connexion. Les impacts sur la tension de telles productions vont être différentes selon le type de réseau auxquelles elles sont connectées. Selon la structure du réseau, les caractéristiques du poste source, le point de raccordement et la puissance injectée par la PDE, la tension peut être élevée au point de raccordement, pouvant même dépasser la limite autorisée ou limite admissible.

ü Dans le réseau de transport, la réactance est supérieure à la résistance, ainsi si  $X \gg R$ , la formule (III.3) peut être simplifiée comme suit :  $\Delta V = \frac{X \cdot Q_N}{V_N}$  .....(III.4)

L'injection de puissance réactive aura donc plus d'impact sur le niveau de tension que l'injection de puissance active.

ü Dans le réseau de distribution, la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique  $R \gg X$ , la formule (III.3) peut être simplifiée comme suit:

$$\Delta V = \frac{R \cdot P_N}{V_N}$$
 .....(III.5)

La puissance active injectée par PDE joue donc un rôle important dans la modification de la tension. De plus, la production des PDE est non garantie en général pour les sources d'énergie renouvelable (caractère intermittent), pouvant provoquer une fluctuation imprévue de la tension. Le plan de tension dans le réseau de distribution dépend fortement du niveau de consommation et du facteur de puissance de ces charges. Un changement de charge provoque une variation de tension sur le réseau. Le cas extrême pour une élévation de tension correspond à une charge consommée nulle associée à une production maximale. Cette situation peut cependant être réaliste en imaginant une consommation nocturne très faible alors que les productions de PDE restent nominales. La tension peut être également affectée par l'apparition de courts-circuits ou de défauts d'isolement provoquant des creux de tension. [2]

**✚ Illustration en simulation du problème de surtension : [13]**

Les simulations présentées ici ont pour but d'illustrer l'impact de l'insertion de PDE sur le réseau de distribution d'électricité.

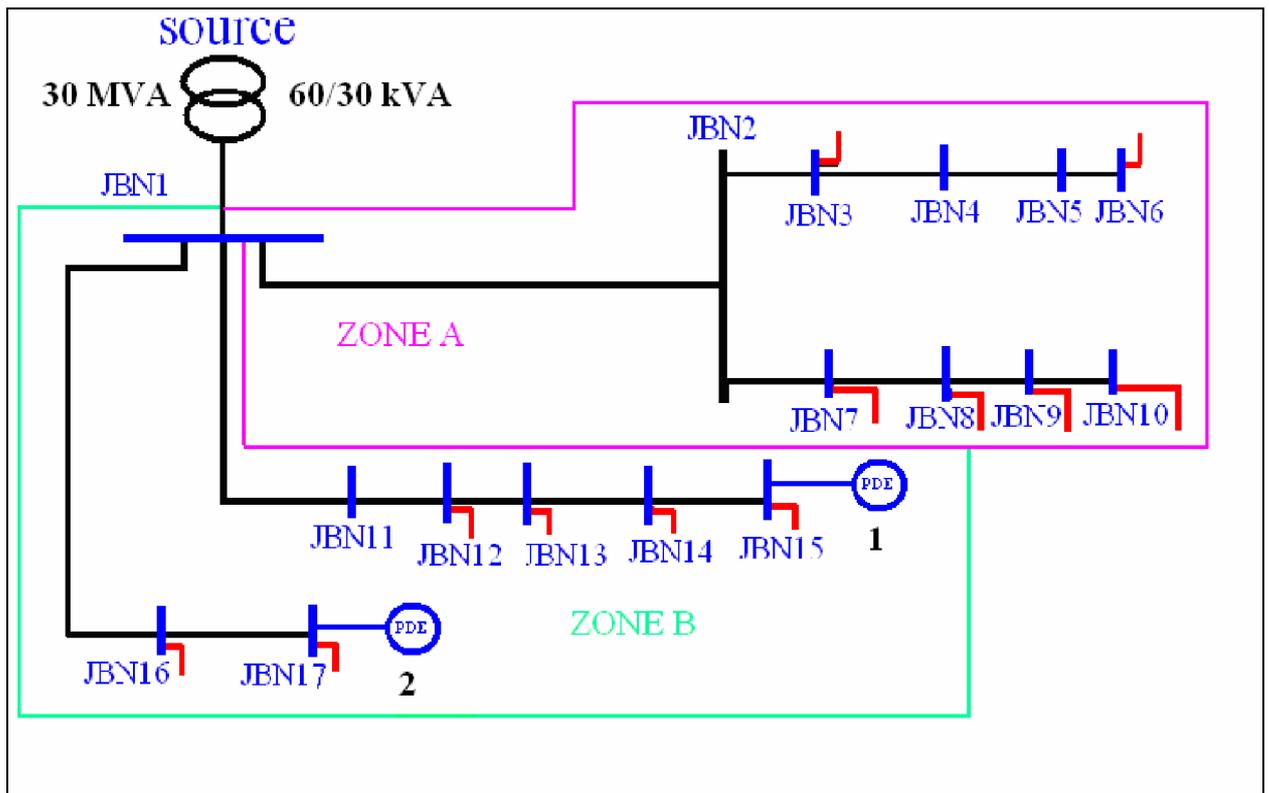


Figure (III.5) – Présentation du réseau d'étude MT.

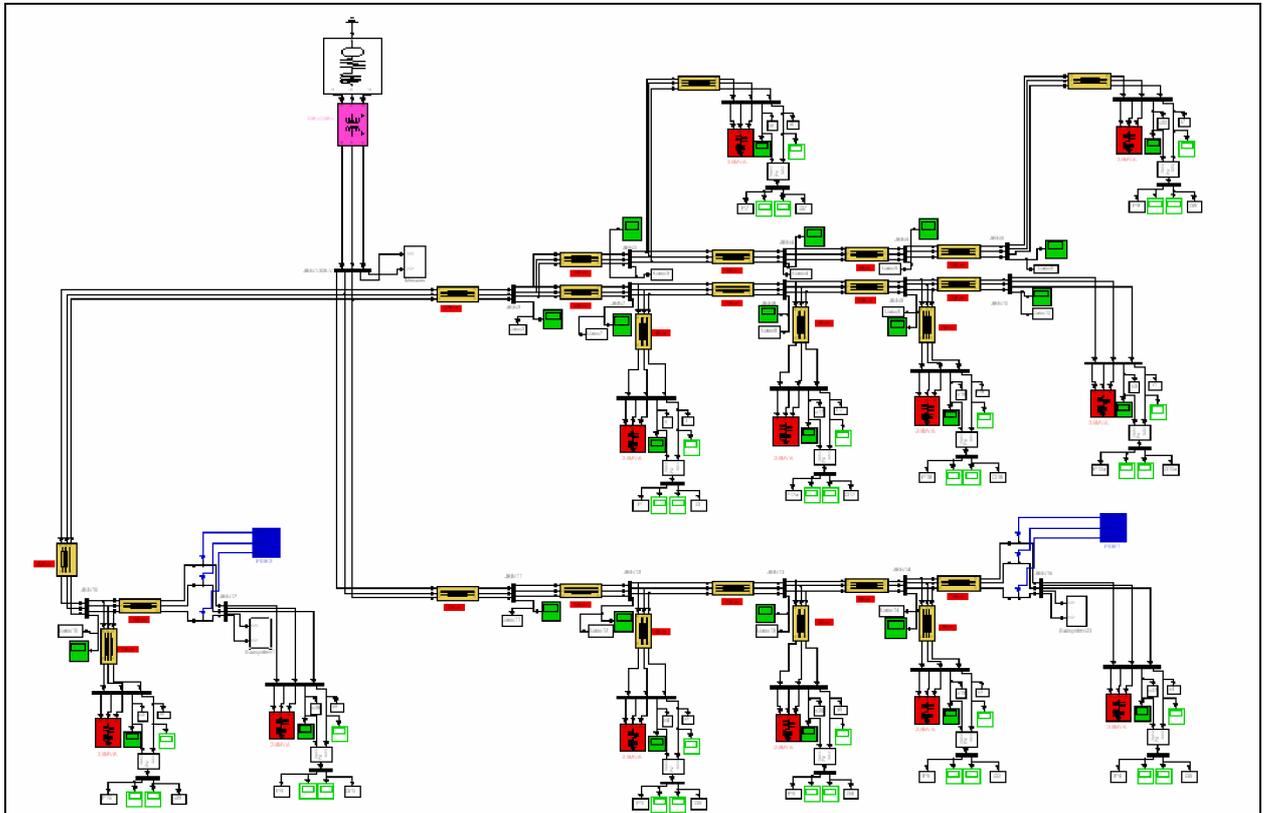


Figure (III.5.a) – Présentation du réseau d'étude MT sous simulink.

§ Structure du réseau. : [13]

Ainsi, la Figure (III.5) présente un réseau MT de type rural de 17 noeuds alimenté par un transformateur HT\HTA de 30 MVA. Ainsi, les courbes Figure (III.6) vont illustrer les conséquences de la production de puissance sur la tension. Deux scenarii sont réalisés, le premier envisage le réseau sans PDE, le second avec PDE. Les courbes Figure (III.6).a (Zone A) et Figure (III.6).b (Zone B) présentent la tension sur ce réseau avec deux états de charge :

- Le premier avec la totalité de la charge.
- Le deuxième avec la moitié de la charge.

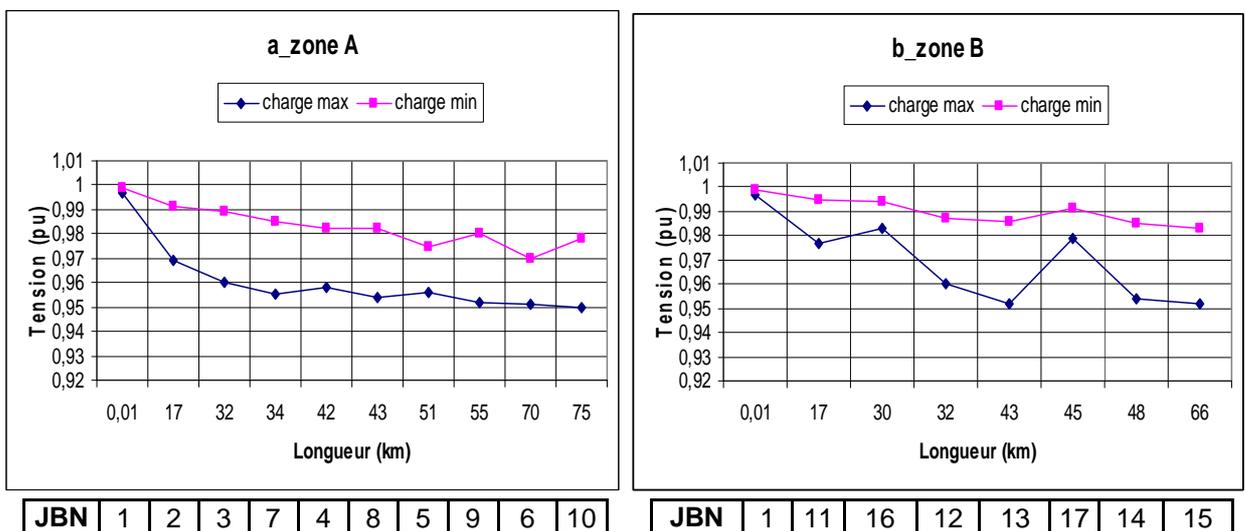


Figure (III.6) : Profile de tension dans tout les JB pour deux régimes de charge sans génération pour les zone A (a) et zone B (b).

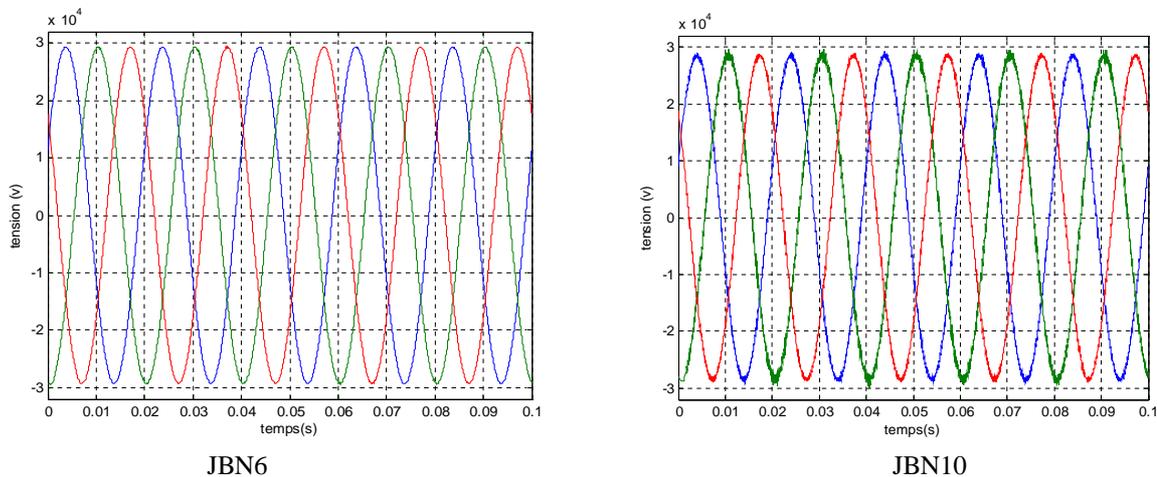


Figure (III.6.1) : Profile de tension pour les JBN 6 et 10 dans la zone A avec la totalité de la charge.

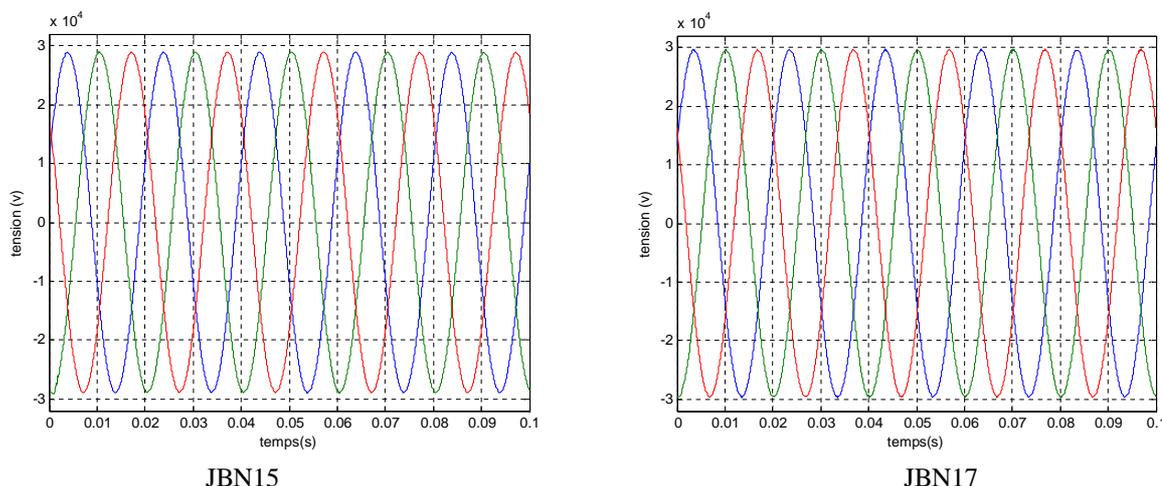


Figure (III.6.2) : Profile de tension pour les JBN 15 et 17 dans la zone B avec la totalité de la charge.

Sans PDE, le réseau est dans une configuration d'exploitation classique. Ainsi la tension chute du poste source jusqu'au point de consommation le plus éloigné. Il est notable que dans les deux zones, la tension atteint des valeurs basses en tension en bout de ligne pour le cas en pleine charge. Cependant celles-ci restent sur l'ensemble du réseau dans les valeurs limites de tensions de +5% et -5% en HTA.

Dans le second scénario, deux PDE sont connectées aux noeuds 15 et 17, Zone B. Les deux productions sont identiques et de 7.5 MW chacune.

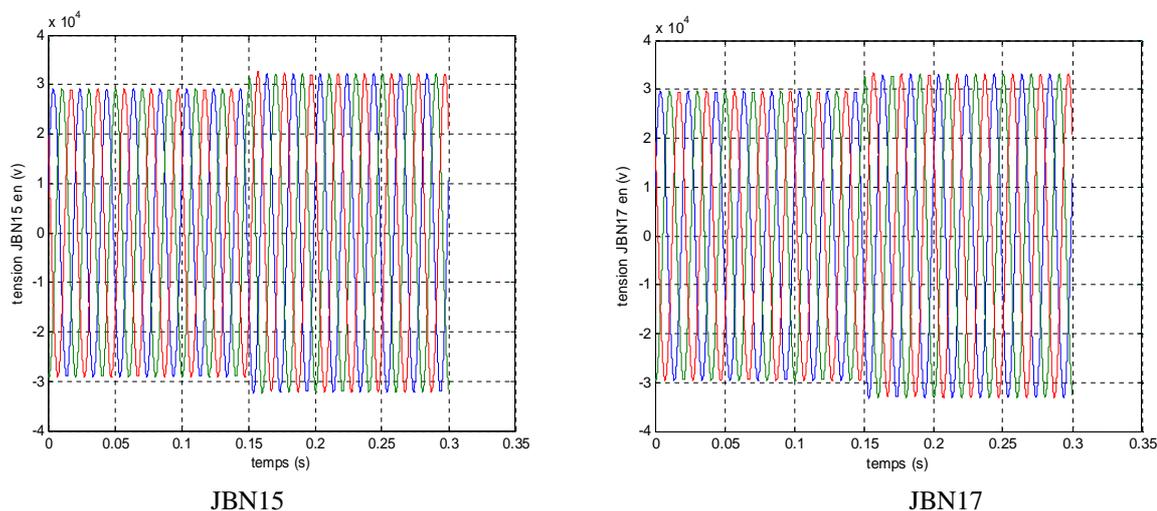


Figure (III.7.1): Profile de tension pour les deux JB de connexion avec la totalité de la charge.

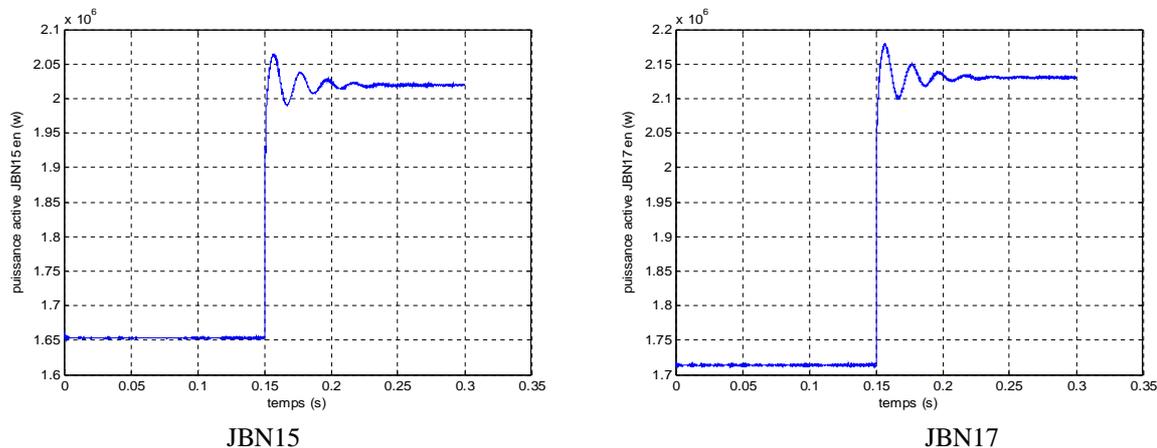


Figure (III.7.2): Profile de puissance active pour les deux JB de connexion avec la totalité de la charge.

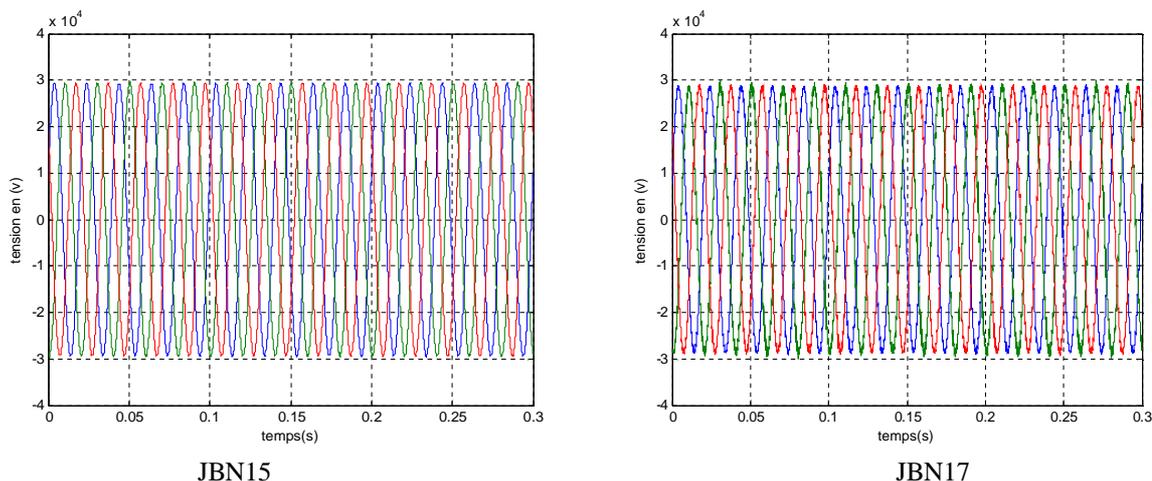


Figure (III.7.3): Profile de tension pour les deux JB après la connexion des PDE avec la totalité de la charge.

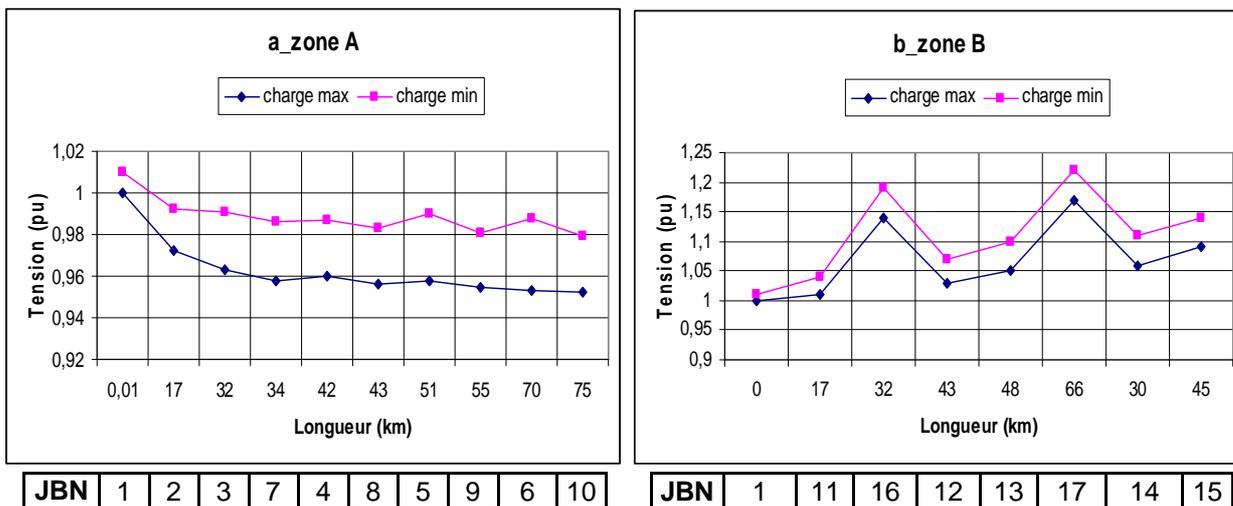


Figure (III.8): Profile de tension dans tout les JB pour deux régimes de charge avec générations pour les zone A (a) et zone B (b).

Ces PDE ne produisent pas de puissance réactive. Cette configuration induit un taux de pénétration de 50%. Nous définissons le taux de pénétration comme le rapport la puissance totale des PDE sur la puissance nominale du poste source :

$$T_{pénétration} = \frac{S_{PDE}}{S_{poste\_source}}$$

De la même façon que pour la Figure (III.6), le tracé des courbes Figure (III.8) est réalisé en pleine charge et en charge partielle. Il est aisément visible que l'injection de puissance entraîne une augmentation de la tension significative au point de connexion des PDE, entraînant dans la zone B un accroissement de celle-ci aux noeuds voisins. Dans le cas d'une charge partielle, la tension atteint même un niveau critique pour les noeuds 14, 15, 16 et 17, supérieur à la tension admissible de 1,05 pu.

Le fait de produire de la puissance entraîne donc une surtension au point de connexion et sur les noeuds voisins. Les conséquences sont le non respect des normes de tension et dans certain cas, si une forte surtension est présentée pendant un temps trop long, généralement d'une centaine de millisecondes, ceci peut également entraîner la déconnexion de la production par l'action d'une protection de découplage pouvant être présentée entre le réseau et la PDE. Pour éviter ces surtensions et par conséquent le découplage de la production, des systèmes de compensation peuvent être utilisés à proximité des productions afin de contrôler la tension. Il peut être également envisagé de faire participer les productions au contrôle de tension grâce à des contrôles efficaces de celles-ci.

### II.9.2.3. A-coups et variations rapides de tension : [20]

- *Objet de l'étude*: Vérifier que le raccordement du PDE n'entraîne pas un niveau inacceptable de variations rapides de tension.

Pour cela, on s'assure que :

- Û L'à-coup de tension à l'enclenchement des transformateurs du PDE ne dépasse pas 5% au point de livraison des installations.
- Û Les fluctuations de puissance du PDE à raccorder n'entraînent pas un dépassement des limites individuelles d'émission en terme de flicker.

#### II.9.2.3.1. A-coup de tension à l'enclenchement des transformateurs : [20]

- *Introduction* : La mise sous tension d'un transformateur de puissance par le réseau provoque un à-coup de la tension.
- *Objet de l'étude* : Vérifier l'impact de la mise sous tension des transformateurs élévateurs des génératrices et/ou d'alimentation des charges du client producteur.
- *Critère de déclenchement de l'étude* : Pour tout type de producteur, **la puissance de base  $S_b$**  est définie comme la somme des  $S_n$  des transformateurs HTA/BT de l'installation mis simultanément sous tension par le réseau. Ces transformateurs sont les transformateur(s) élévateur(s) de groupe(s) de production. [20]

La puissance de l'ensemble de ces transformateurs élévateurs sera égale à :

- $S_{ntrG}$ , puissance nominale du plus gros transformateur élévateur des groupes, si la mise sous tension des transformateurs suite à découplage ou mise hors tension de l'installation est échelonnée (un à un deux par deux,..... et dans la limite du 8IB de la protection C13-100),
- [nombre de groupes x  $S_{ntrG}$ ], si la mise sous tension des transformateurs est simultanée par fermeture du disjoncteur général,
- Si les transformateurs sont directement mis sous tension par les groupes. Il n'y a donc pas d'étude d'à-coups à réaliser. [21]

**Le courant d'enclenchement  $I_e$**  est le courant d'enclenchement **crête** (valeur instantanée maximale) le plus élevé parmi les transformateurs utilisés pour le calcul de la puissance de base  $S_b$ . Le courant d'enclenchement  $I_e$  est rapporté au courant nominal crête (courant nominal efficace x 2 ) du transformateur concerné. [21]

**R, X et Scc** sont respectivement la résistance amont, la réactance amont et la puissance de court-circuit amont au point de raccordement de l'installation. Ces valeurs sont à calculer pour une puissance de court-circuit HTB minimum. [21]

L'étude est à réaliser si la puissance de base  $S_b$  (MVA) est supérieure à la valeur indiquée dans les tableaux 1 et 2 ci-dessous et/ou calculée par interpolation linéaire sur les trois grandeurs d'entrée : courant d'enclenchement, niveau de Scc au PDL et angle de l'impédance du réseau au PDL des tableaux suivants. [20]

Ces tableaux à double entrée donnent la puissance  $S_b$  à ne pas dépasser pour obtenir une probabilité suffisante d'à-coup de tension inférieur à 5%.

\_le tableau n°III.1 est établi pour un courant d'enclenchement de 7In crête

\_le tableau n°III.2 est établi pour un courant d'enclenchement de 11In crête

Les tableaux sont définis comme suit :

\_entrée horizontale :  $\text{Arctg}(X/R) = 30, 50, 70, 85^\circ$

\_entrée verticale :  $S_{cc} = 40, 60, 100, 150, 200$  MVA. [20]

<b>Arctg (X/R)</b> <b>Scc</b>	30°	50°	70°	85°
40	5.7	2.5	1.3	0.9
60	8.2	3.8	1.9	1.6
100	14.5	5.7	3.1	2.5
150	>19.5	8.8	5	3.8
200	>19.5	12.6	6.9	5.7

Tableau III.1: seuils de puissance de base pour un courant d'enclenchement  $I_e$  égal à 7 In crête.

<b>Arctg (X/R)</b> <b>Scc</b>	30°	50°	70°	85°
40	3.8	1.9	0.9	0.7
60	5	2.5	1.3	0.9
100	7.6	3.8	2.5	1.9
150	13.9	6.3	3.1	2.5
200	17.6	8.2	4.4	3.8

Tableau III.2 : seuils de puissance de base pour un courant d'enclenchement égal à 11 In crête

• **Hypothèses :**

a. **Réseau :** Le réseau est modélisé comme ci-dessous.[20]

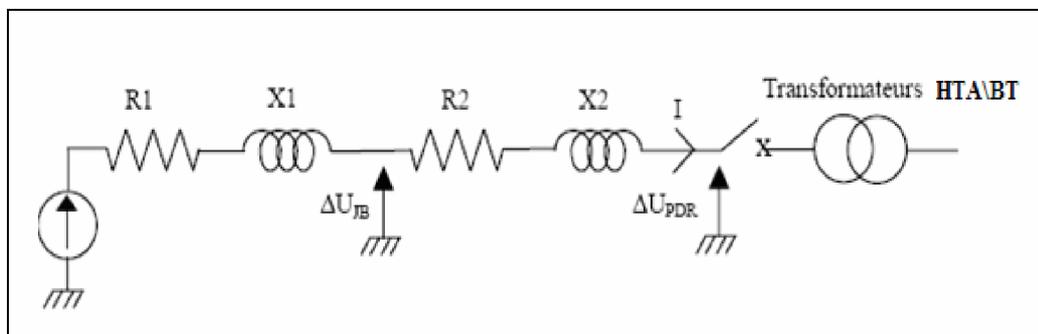


Figure (III.9) Le réseau électrique équivalent.

Ø Détermination de la solution de raccordement : [20]

Û Si  $\Delta U/U$  au PDL  $\leq 5\%$  : le raccordement est possible en l'état.

Û Si  $\Delta U/U$  au PDL  $> 5\%$  et  $< \text{à } 10\%$  :

- le raccordement n'est pas possible en l'état. On ramène le  $\Delta U/U$  au PDL à une valeur inférieure à 5% en proposant, par ordre de priorité décroissante :
- la réalisation de l'enclenchement séquentiel des transformateurs (si mise sous tension simultanée), le temps minimal entre 2 enclenchements devant être de 1 seconde,
- la réalisation de la mise sous tension des transformateurs par les machines (impossible avec des génératrices de type asynchrone),
- la réduction du Id/In des transformateurs,
- installation d'un dispositif limiteur de courant

Si malgré ces solutions, l'à-coup lié à l'enclenchement d'un seul transformateur ne peut pas être réduit à moins de 5% au PDL, le raccordement est accepté sous réserve :

- de la réalisation des enclenchements avec un temps minimal de 10 minutes entre chaque transformateur enclenché,
- d'informer le demandeur sur la nécessité de réduire l'occurrence de ces enclenchements compte tenu des conséquences néfastes des perturbations induites (déclenchements intempestifs du réseau HTA, difficultés d'enclenchement...) pour lui-même et les autres utilisateurs.

Û Si  $\Delta U/U$  au PDL  $> 10\%$  :

- le raccordement est impossible en l'état. On ramène le  $\Delta U/U$  au PDL à une valeur inférieure à 5% en proposant, par ordre de priorité décroissante :
- la réalisation de l'enclenchement séquentiel des transformateurs (si mise sous tension simultanée), le temps minimal entre 2 enclenchements devant être de 1 seconde,
- la réalisation de la mise sous tension des transformateurs par les machines (impossible avec des génératrices de type asynchrone),
- la réduction du Id/In des transformateurs.
- installation d'un dispositif limiteur de courant.

Si malgré ces solutions, l'à-coup lié à l'enclenchement d'un seul transformateur ne peut pas être réduit à moins de 5% au PDL (mais est inférieur à 10%), le raccordement est accepté sous réserve :

- de la réalisation des enclenchements avec un temps minimal de 10 minutes entre chaque transformateur enclenché,
- d'informer le demandeur sur la nécessité de réduire l'occurrence de ces enclenchements compte tenu des conséquences néfastes des perturbations induites (déclenchements intempestifs du réseau HTA, difficultés d'enclenchement...) pour lui-même et les autres utilisateurs.

Si, malgré tout, l'à-coup reste supérieur à 10%, une autre solution de raccordement doit être envisagée.

### II.9.2.3.2. Variations rapides de tension (Papillotement ou Flicker) :

L'énergie éolienne revêt une importance particulière dans la problématique actuelle des réseaux électriques, que cela soit par la nouveauté de l'intégration de ces systèmes, le caractère intermittent de la source primaire ou encore les évolutions technologiques qui l'accompagnent. Ces dernières années, la présence de l'énergie éolienne dans le réseau électrique a augmenté considérablement et cela va s'amplifier à travers le monde car de nombreux pays prévoient de futurs développements. L'influence des parcs éoliens dans le fonctionnement du système électrique va de pair avec l'importance de la pénétration de l'énergie éolienne dans le réseau. Dans ce contexte, les contraintes d'interconnexion pour les parcs éoliens sont en train de devenir plus restrictives. Deux des contraintes les plus importantes sont le contrôle de la puissance réactive et les variations rapides de tension (flicker). On s'intéresse ici à ce problème de **flicker**. [10]

Objet de l'étude: [20]

Vérifier que les fluctuations de puissance d'un site à raccorder au réseau de distribution n'entraînent pas un niveau d'émission inacceptable en terme de papillotement (ou flicker).

Dans le cas du raccordement d'un nouveau site éolien, les fluctuations prises en compte sont:

- Û d'une part, les variations de puissance produite ou consommée à cause des variations rapides du vent, du gradient de vent et de l'impact aérodynamique du mât,
- Û d'autre part, les variations de puissance produite ou consommée lors des opérations de démarrage, montée en puissance et arrêt des installations de production à cause des variations lentes du vent.

Cette étude est réalisée pour tout site comportant des équipements à puissance variable et de manière systématique pour toute étude de raccordement d'un site de production éolienne.

La présente fiche décrit uniquement les études de raccordement d'un site de production éolienne.

- Définitions: [20]

Le terme **flicker** (ou papillotement) est utilisé pour désigner les variations de tension de courte durée, apparaissant dans le réseau électrique, et risquant de provoquer le scintillement (ou papillotement) des ampoules. La raison la plus évidente des variations rapides de puissance observées est l'ombre du mât, la puissance du système diminue chaque fois qu'une pale passe devant la mât, la fréquence de variation est égale à 2 ou 3 fois la fréquence de rotation selon le nombre de pales (2 ou 3). La deuxième raison qui engendre des variations de même fréquence est l'effet de la couche limite terrestre qui provoque un cisaillement du profil du vent. La troisième cause est la turbulence, c.-à-d. les variations stochastiques du vent, qui sont dues aux rafales. Une rafale peut durer de une à quelques dizaines de secondes et frappe partiellement le plan de l'éolienne. Une rotation du rotor dure typiquement deux secondes (à 25 t/min). Chaque pale rencontrera alors la même rafale plusieurs fois. Pratiquement il n'est pas possible de mesurer la contribution d'un paramètre indépendamment des autres, on a recours généralement à des simulations en utilisant une description adéquate du vent vue par le rotor qui ont montré que la turbulence est la cause principale des fluctuations de la puissance produite [23].

Ce phénomène peut surgir d'autant plus fréquemment que l'éolienne est raccordée à un réseau faible, les variations fréquentes du vent causant alors des variations importantes de la production d'électricité. [22]

#### Û **Classification des variations rapides :** [20]

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

**Le papillotement lors des opérations de couplage** « switching opérations » (type2):

Les opérations de commutation produisent également du flicker. Des opérations de commutation typiques sont la connexion et déconnexion du réseau, des aérogénérateurs. Des démarrages, arrêts ou commutations entre générateurs entraînent des variations de la puissance produite, celles-ci provoquant des variations de tension dans le Point de Connexion Commun et donc l'émission de flicker. [20]

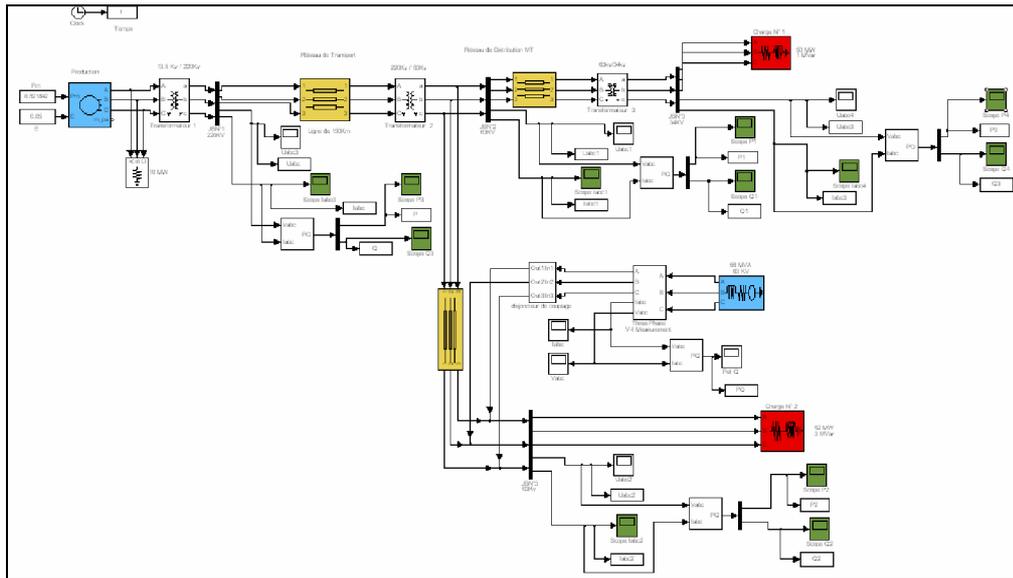


Figure (III.10.a) :« Modèle sous simulink du réseau test ».

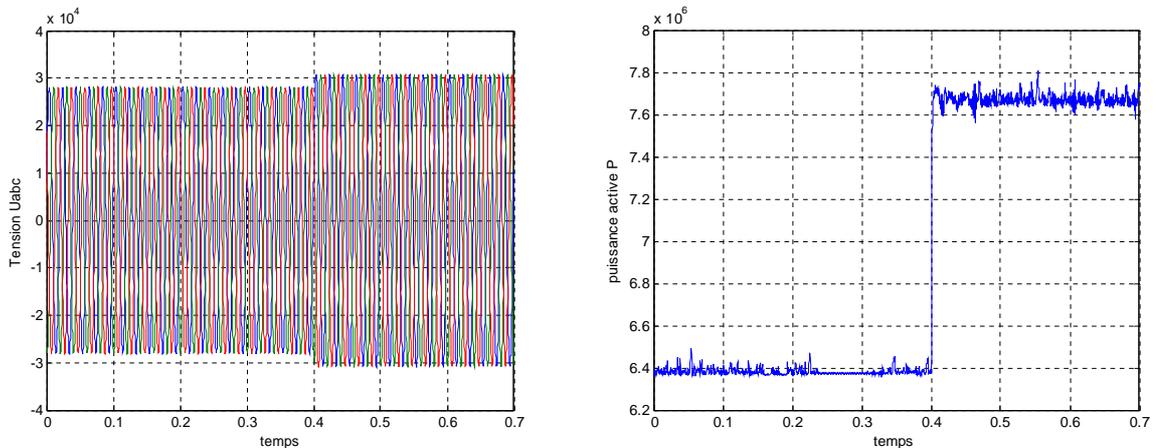


Figure (III.10.b) : Evolution de la tension et de la puissance lors du couplage de PDE.

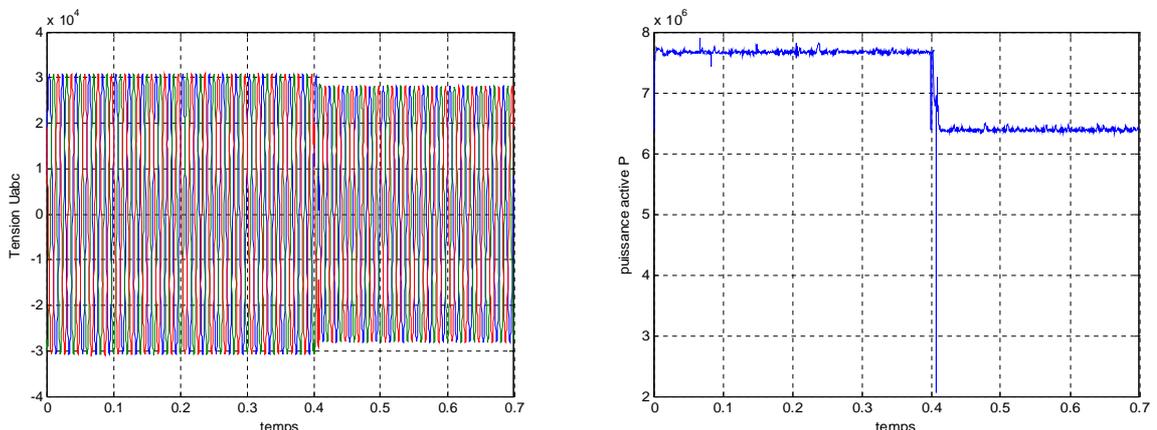


Figure (III.10.c) : Evolution de la tension et de la puissance lors du découplage de PDE.

Lorsque on fait le couplage, on a une surtension (figure (III.10.b)) parce qu'il y a une puissance qui s'est ajoutée. Pour cela, il faut diminuer la puissance de la source pour maintenir la tension aux normes.

Maintenant, si après un certain temps de fonctionnement, il y avait un découplage de la PDE (figure (III.10.c)), alors on obtient une chute de tension. Pour cela, il faut augmenter la puissance de la source pour remonter la tension dans sa plage nominale.

#### ✚ **Le papillotement en fonctionnement établi** « continuous opération » (type 1):

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

Des mesures de plusieurs minutes et à différentes vitesses de vent doivent être effectuées pour déterminer l'émission de flicker d'une éolienne en fonctionnement continu. [20]

Le flicker émis par une éolienne est influencé par le réseau auquel celle-ci est connectée. Or, on veut en général connaître le degré d'émission de flicker d'un aérogénérateur indépendamment du réseau. On mesure pour cela l'intensité, en plus de la tension produite par l'éolienne. Ces données sont ensuite utilisées sur un modèle de réseau fictif, pour mesurer le flicker correspondant à différents angles du réseau et puissances de court-circuit. Le facteur de flicker final est une synthèse de tous ces calculs et mesures à différentes vitesses de vent, différents angles du réseau etc...[20]

Le réseau test est le même présenté dans la figure (III.10.a). Après simulation, on a obtenu les résultats suivants :

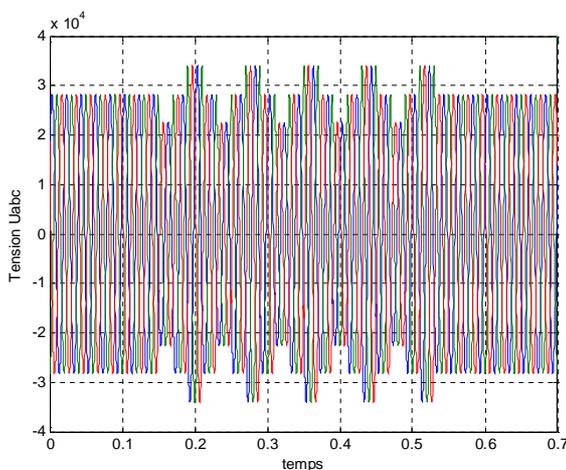


Figure (III.11.a). Les variations rapides de tension engendrées dans le JB de connexion en fonctionnement établi.

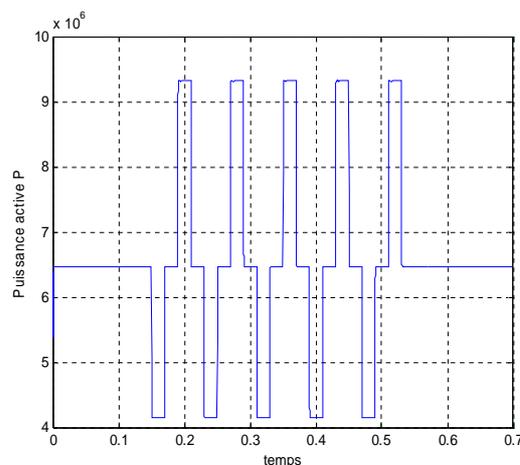


Figure (III.11.b). Les variations de la puissance produite par PDE.

Lorsqu'on raccorde la PDE au niveau du JB 30Kv, il apparaît clairement que la variation de tension est proportionnelle à la variation de la puissance du PDE, par exemple de 0.15 à 0.17 s, on a une diminution de 0.2% de la puissance de PDE et de 0.19 à 0.21 s, on a une augmentation de 0.2% de la puissance de PDE. Les résultats sont montrés dans les figures (III.11.a), (III.11.b).

#### ü **Indicateurs du niveau de flicker** : [20]

Les indicateurs de la sévérité du flicker sont d'une part, le Pst, flicker à court terme quantifié sur 10 mn et d'autre part, le Plt, flicker à long terme quantifié sur 120 mn.

\_Le « Plt en fonctionnement établi » indique la sévérité du phénomène de flicker en fonctionnement établi décrit au paragraphe précédent.

\_Le « Pst et le Plt lors des opérations de couplage » indiquent la sévérité du phénomène de flicker lors des opérations de couplage décrit au paragraphe précédent.

- **Hypothèses:** [20]

- a. **Réseau :** Le réseau HTB est modélisé par une source de tension en série avec une impédance représentative de la puissance de Court-circuit minimum fournie par le réseau HTB au jeu de barres HTB du Transformateur HTB/HTA duquel est issu le raccordement du Producteur Etudié.

La solution de raccordement est déterminée en schéma normal et secourant du réseau HTA et dans le cas où un transformateur est indisponible au poste-source. Afin de définir les conditions d'exploitation en schéma secours, on étudiera le cas où le départ HTA sur lequel est raccordé le Producteur est secouru par le départ « secours » habituel, éventuellement issu d'un poste HTB/HTA différent.

- b. **Données d'entrée :** [20]

- § Les caractéristiques électriques ( $P_n$ ,  $\cos(\varphi)$ ,  $S_n$ ),

- § Le rapport d'essais des aérogénérateurs réalisé conformément à la norme CEI 61400-21. Ces données permettent de mener un calcul précis de la contribution à la sévérité du flicker qui s'exprime en Pst et Plt,

- c. **Seuils applicables :** [20]

Les limites d'émission du Producteur sont celles définies par l'arrêté du 17 mars 2003, à savoir :

$$Pst \leq 0.35 \quad Plt \leq 0.25$$

Remarque : il faut s'assurer que la Puissance de court-circuit au Point de livraison (PDL) du Producteur est supérieure à 40 MVA (cf arrêtés du 17 mars 2003). Si ce n'est pas le cas, les limites d'émission à prendre en compte doivent être multipliées par  $40(MVA)/P_{ccPDL}$ .

- Il faut alors voir les conséquences possibles pour les utilisateurs du réseau et lever éventuellement cette contrainte générée par une Pcc trop faible au PDL. [20]

Les limites suivantes sont à appliquer dans le cas des postes sources n'alimentant pas déjà une installation identifiée comme participant de façon notable au flicker.

Ces seuils de partage pris en compte dans la suite sont tels que:

\_ la somme des puissances souscrites des clients consommateurs HTA raccordés (ou dont le raccordement est décidé) au même transformateur HTB/HTA et susceptibles d'être perturbateurs simultanément en matière de flicker n'excède pas 12 MW si le transformateur HTB/HTA est raccordé en 60 ou 90 kV et 21 MW si le transformateur HTB/HTA est raccordé en 220 kV, [21]

\_ la somme des puissances des installations de production HTA raccordées au même transformateur HTB/HTA n'excède pas 43 MW si le transformateur HTB/HTA est raccordé en 60 ou 90 kV et 84 MW si le transformateur HTB/HTA est raccordé en 220 kV. [21]

Chaque site perturbateur peut bénéficier des niveaux d'émission de base de 0,35 pour le Pst et de 0,25 pour le Plt, les charges significatives ont une limitation de leur émission croissante avec la puissance souscrite des utilisateurs jusqu'à une limite de 12 MW. [21]

En conséquence pour les études de raccordement des sites perturbateurs (dont les sites de production éolienne), il faut respecter les limites d'émission indiquées ci-après selon la puissance de l'installation et la nature du poste source HTB/HTA de raccordement envisagé. [21]

**C.1. Limites d'émission en Pst : [21]**

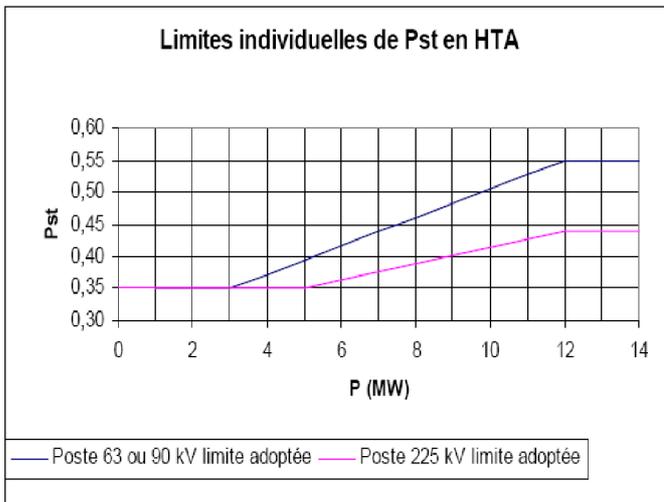


Figure (III.12) Limites d'émission en Pst

P site (MW)	Poste 60 ou 90kV	Poste 220kV
0 à 3	0.35	0.35
4	0.37	0.35
5	0.39	0.35
6	0.42	0.36
7	0.44	0.38
8	0.46	0.39
9	0.48	0.40
10	0.51	0.41
11	0.53	0.43
12	0.55	0.44
>12	0.55	0.44

Tableau III.3

**C.2. Limites d'émission en Plt : [21]**

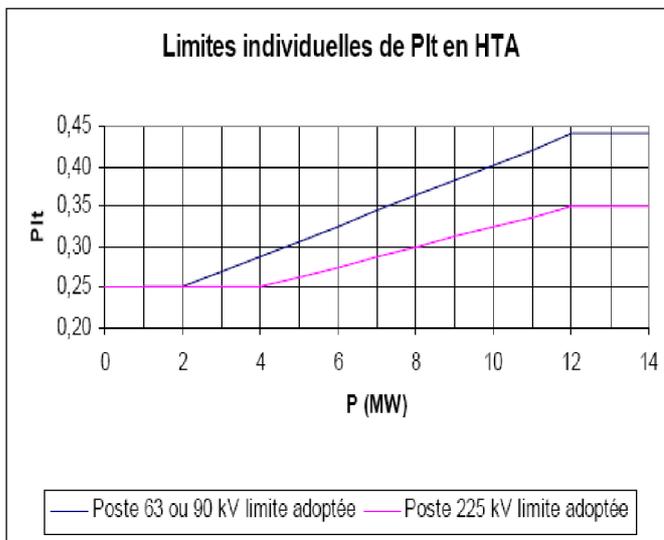


Figure (III.13) Limites d'émission en Plt

P site (MW)	Poste 60 ou 90kV	Poste 220kV
0 à 2	0.25	0.25
3	0.27	0.25
4	0.29	0.25
5	0.31	0.26
6	0.33	0.28
7	0.35	0.29
8	0.36	0.30
9	0.38	0.31
10	0.40	0.33
11	0.42	0.34
12	0.44	0.35
>12	0.44	0.35

Tableau III.4

### **III. CONCLUSION**

Nous avons vu, au cours de ce chapitre, différents impacts de la production décentralisée sur les réseaux électriques. Les GED, tant qu'elles restent des sources marginales, n'ont pas de grandes influences, ni sur le fonctionnement, ni sur la qualité de service du réseau. Si on prévoit une introduction massive des GED dans le réseau dans les années à venir, un des grands enjeux sera celui de la gestion des situations critiques.

Ainsi ce chapitre expose la problématique induite par l'arrivée des PDE sur la tension du réseau de distribution. Ce réseau, de par son architecture et sa conception, n'est pas adapté pour un accueil significatif de ces productions. Ainsi, le fait de produire une quantité de puissance localement sur un réseau de distribution crée des problèmes de tension au point de connexion. Cette surtension s'étend aux noeuds voisins et peut selon les niveaux de charge du réseaux devenir critiques. Ainsi, il apparaît nécessaire de penser des contrôles intelligents pour ces PDE dans le but de les faire participer activement à la conduite du réseau et dans ce cas précis au contrôle de tension.

Il appartient aux planificateurs de réseaux de réfléchir aux dispositions qui seront alors à prendre pour que la qualité de service électrique que nous connaissons aujourd'hui soit maintenue.

**Chapitre IV :**

***Réglage de tension en  
présence de PDE sur le  
réseau de distribution***



## **I. INTRODUCTION :**

En général, pendant une saison, la variation sur une journée d'une charge située dans une certaine partie du réseau de distribution est régulière et similaire d'un jour à l'autre. La conception du système de régulation de la tension dans les réseaux de distribution est basée sur la prédiction de la variation des charges sur une journée et selon la saison. [24]

En l'absence de sources de production dispersée, le flux de puissance dans un réseau de distribution est unidirectionnel et descendant en amplitude avec l'augmentation de la distance jusqu'au poste source (station de transformation). [24]

L'implantation de sources de production décentralisée dans le réseau de distribution peut changer les directions des flux de puissance (d'une manière imprédictible). Suite aux changements dans ces flux des puissances, les dispositifs classiques de régulation de tension (les transformateurs avec des régulateurs en charge, les bancs de condensateurs...) peuvent avoir un fonctionnement inadéquat, voir défectueux. [25]

La valeur de la tension à la station de transformation est réglée afin de pouvoir maintenir la tension au noeud le plus éloigné de la station à l'intérieur des plages prévues par les textes réglementaires ou normatifs et de ne pas dépasser les plafonds de tension qu'ils fixent (EN50160:  $-10\%U < U < +10\%U$ ). [25]

L'implantation d'une source de production décentralisée conduit à une augmentation relative de la tension. Si la tension au poste source est toujours réglée à une valeur près de la limite maximale admissible par la norme, la tension en aval de station de transformation peut alors sortir de l'intervalle toléré. Dans le contexte de l'augmentation de tension, les conditions limites (charges - valeur minimale, production - valeur maximale), sont en général critiques pour le niveau d'insertion des sources de production décentralisée. [24]

Nous nous intéressons dans ce chapitre à la régulation de la tension au point de connexion d'une source de production décentralisée. Une première partie explique l'utilité des systèmes de réglage de la tension pour les sources de production décentralisées. Ensuite, les principaux moyens de réglage de la tension utilisés dans les réseaux de distribution sont répertoriés. Parmi ces moyens de réglage, on s'intéresse au réglage de la tension dit «tangente phi» où les puissances active et réactive sont fixées, ainsi qu'un contrôle à puissance et tension fixes. Ainsi ce chapitre expose les travaux de modélisation effectués pour pouvoir utiliser les modèles de régulations précités. Ces modèles nous serviront de base pour les études de régulations de tension à l'aide de PDE et pour la création d'un régulateur « intelligent ».

## II. Moyens de réglage de la tension dans un réseau de distribution : [24]

Le schéma général d'un réseau de distribution est donné dans la Figure (IV-1). On peut remarquer que le réseau est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions.

On rencontre successivement en suivant le sens d'écoulement de la puissance les éléments ci-après, qui sont détaillés plus loin.

Les postes HTB/HTA sont parfois alimentés en antenne mais le plus souvent avec un jeu de barres recevant plusieurs arrivées HTB. Un ou plusieurs transformateurs HTB/HTA sont raccordés sur ce jeu de barres HTB, simple ou multiple. Un ou plusieurs jeux de barres HTA sont à l'aval de ces transformateurs. Des départs HTA sont raccordés sur ces jeux de barres

- soit en câbles souterrains, quasiment toujours bouclables, mais exploités ouverts en un point sur la boucle;
- soit en lignes aériennes parfois encore en antenne, mais de plus en plus souvent bouclables, elles aussi.

Le long de ces liaisons HTA, on trouve:

- Sur les câbles souterrains, des postes de transformation maçonnés HTA/BTA, raccordés généralement en coupure d'artère, parfois en double dérivation;
- sur les lignes aériennes, des postes de transformation simplifiés HTA/BTA, raccordés par des piquages en antenne alimentant soit, le plus souvent, des postes aériens sur poteau, soit des postes sous abri dits bas de poteau.

À l'aval de ces transformateurs HTA/BTA, il y a les réseaux BTA qui ne sont pas en général bouclables, sauf quelques réseaux urbains de type particulier où les conducteurs sont bouclés et refermés entre postes HTA/BTA.

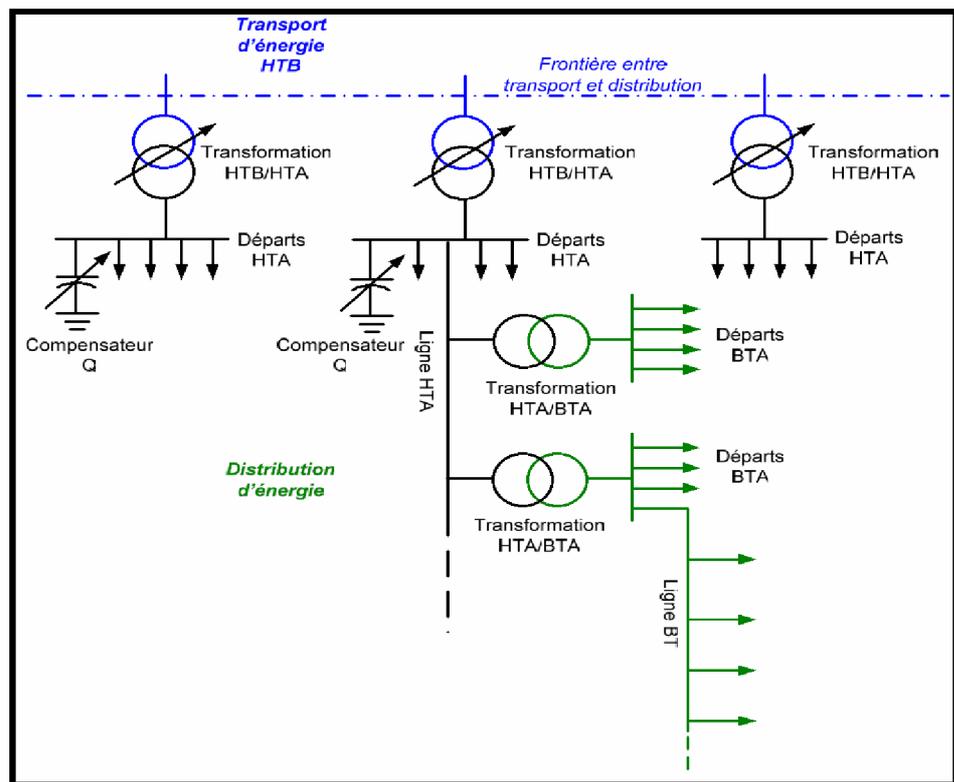


Figure (IV-1) : Schéma général d'un réseau de distribution

Pour illustrer les moyens de réglage de la tension qui peuvent être utilisés dans un réseau de distribution, on emploie le réseau élémentaire suivant (Figure IV-2), dans lequel est connectée une source de production décentralisée, DG.

La liaison avec le réseau de transport situé en en amont est assurée par un transformateur HTB/HTA, muni d'un régleur en charge.

La source de production décentralisée ('D<sub>G</sub>') avec une charge (P<sub>L</sub>, Q<sub>L</sub>) et un dispositif de compensation de la puissance réactive (Q<sub>comp</sub>) sont connectés sur le même noeud, au bout d'une ligne HTA d'impédance Z. [24]

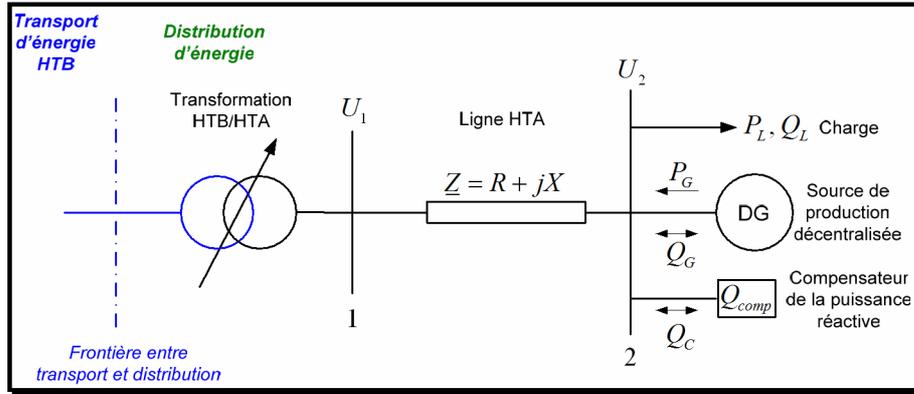


Figure (IV-2) : Illustration des moyens de réglage de la tension

L'expression approchée de la chute de tension sur la ligne est donnée par :

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{R(-P_G + P_L) + X(-Q_G + Q_L - Q_C)}{U_2} \dots\dots\dots\text{IV.1}$$

La valeur approximative de la tension au noeud 2 (U<sub>2</sub>) peut être calculée à l'aide de la relation :

$$U_2 \approx \frac{1}{2}U_1 + \frac{1}{2}\sqrt{U_1^2 - 4R(P_L - P_G) - 4X(Q_L \pm Q_G \pm Q_C)} \dots\dots\dots\text{IV.2}$$

On peut donc remarquer les moyens principaux disponibles pour régler la tension U<sub>2</sub> en charge;

- \_ Le réglage de la tension au noeud 1 (U<sub>1</sub>) par le transformateur muni d'un régleur.
- \_ L'action sur la puissance active fournie par la source de production (P<sub>G</sub>).
- \_ L'action sur la puissance réactive produite / consommée par la source (Q<sub>G</sub>).
- \_ L'action sur la puissance réactive injectée / absorbée par le compensateur (Q<sub>C</sub>).

Tous ces moyens de réglage ont été répertoriés et décrits en [26].

Pour palier au problème de surtension, il est possible d'utiliser les PDE pour aider au réglage de tension en utilisant les possibilités d'absorption ou de production de puissance réactive. A l'heure actuelle, le distributeur impose un fonctionnement à puissances constantes appelé contrôle en tangente phi. Les conditions de raccordement varient en fonction de la taille de la PDE ainsi que du niveau de tension auquel la production est raccordée. Le Tableau IV-1 donne les puissances limites de raccordement pour chaque niveau de tension des réseaux de distributions. [2]

Niveau de tension	Puissance limitée
BT	250 kVA
HTA	12 MW

Tableau IV-1:puissance limite des PDE en fonction du niveau de tension considéré.

Ainsi sur un réseau HTA le distributeur fixe les consignes de puissances active et réactive et peut les réactualiser mensuellement en fonction des impératifs d'exploitation du réseau. Les consignes de puissances sont également fonction de la puissance de la production.

Le Tableau IV-2 résume les capacités de production de puissance réactive demandées aux installations nécessaires pour un raccordement au réseau de distribution [2].

Taille de l'installation	Capacité de production en réactif demandée	Capacité d'absorption en réactif demandée
<1MW	0.4xSn	Absorption interdite en BT
>1MW<10MW	0.5xSn	0.1xSn
>10MW	0.6xSn	0.2xSn

Tableau IV-2 : Capacité de réglage demandée aux productions en fonction de leur puissance.

## II.1. Utilisation spécifique des PDE :

Comme il a été expliqué précédemment, la connexion de PDE modifie le plan de tension du réseau en injectant une puissance produite en un point du réseau. Cependant, beaucoup d'études sont menées dans l'optique de trouver des solutions efficaces quant à l'intégration de ces PDE dans le réseau de distribution. Des contrôles de PDE en puissance et en tension existent déjà, le principe de ceux-ci diffère en fonction du type de PDE utilisée à savoir un raccordement direct de la machine synchrone ou un interfaçage d'électronique de puissance. [27]

Pour les PDE de type machine tournante (machine synchrone), il existe deux types de régulation:

§ Le régulateur de tension (Automatic Voltage Regulator: AVR) est capable de maintenir la tension de la machine constante. Ce régulateur est souvent utilisé pour les générateurs de quelques dizaines à quelques centaines de MVA dans le réseau de transport ou, par les générateurs fonctionnant en réseau séparé. Le principe est de régler la tension via l'excitation de la machine. En sous excitation, la machine réagit comme une inductance en absorbant de la puissance réactive induisant donc une baisse de la tension réseau. A l'inverse, si celle-ci est surexcitée elle fournit de la puissance réactive induisant une augmentation de la tension réseau. [27]

§ Le régulateur de facteur de puissance (Power Factor : PF/VAR) est capable de maintenir le facteur de puissance ou la puissance réactive constante. Ce régulateur est souvent utilisé pour les PDE ou les générateurs connectés aux réseaux de distribution de quelques kVA à quelques dizaines de MVA. Ce système de régulation (PF/VAR) est bien adapté pour les PDE, en particulier celles de petites puissances. [27]

De la même façon, pour les PDE utilisant une interface d'électronique de puissance (onduleur) pour leur connexion au réseau, il est possible de contrôler les courants fournis par l'onduleur de manière à créer des régulations similaires à celles exposées pour les machines synchrones :

§ La régulation en tension ou mode P/V : dans ce mode, la commande de l'onduleur est créée pour fixer au noeud de connexion la tension et la puissance active de consigne.

La tension au point de connexion est contrôlée par injection ou absorption de puissance réactive. Un contrôle adapté de l'association source primaire et onduleur de tension permet de fixer la puissance active et la tension via les courants produits. Ainsi il est possible de contrôler, dans les limites du système la tension et la puissance active au point de connexion. [27]

§ La régulation en puissance ou mode P/Q : dans ce mode, la commande de l'onduleur est créée pour fixer au noeud de connexion les puissances active et réactive de consigne.

Ce modèle de régulation est très similaire au mode P/V. Une boucle de régulation en courant génère la commande de l'onduleur et fixe les puissances au noeud de connexion de la PDE via les courants produits sur le réseau. [2]

## II.2. Contrôles innovants de tension sur les réseaux de distribution grâce aux PDE :

La participation au réglage de tension ainsi que la proposition de solutions pour les problèmes liés à l'introduction des PDE sont des sujets de recherche très présents dans la littérature, que se soit pour la réorganisation du système de protection, pour une meilleure gestion de l'énergie ou pour des réglages de fréquence et de tension. [2]

Dans notre problématique du contrôle de tension sur les réseaux HTA, deux axes de recherche se dégagent. Le premier axe envisage un contrôle de tension grâce à une coordination des PDE. Le deuxième envisage un contrôle de tension sans coordination et réalisé par une adaptation des productions de puissances autonome et locale de chacune des PDE. La Figure (IV-3) illustre ces deux méthodes. [2]

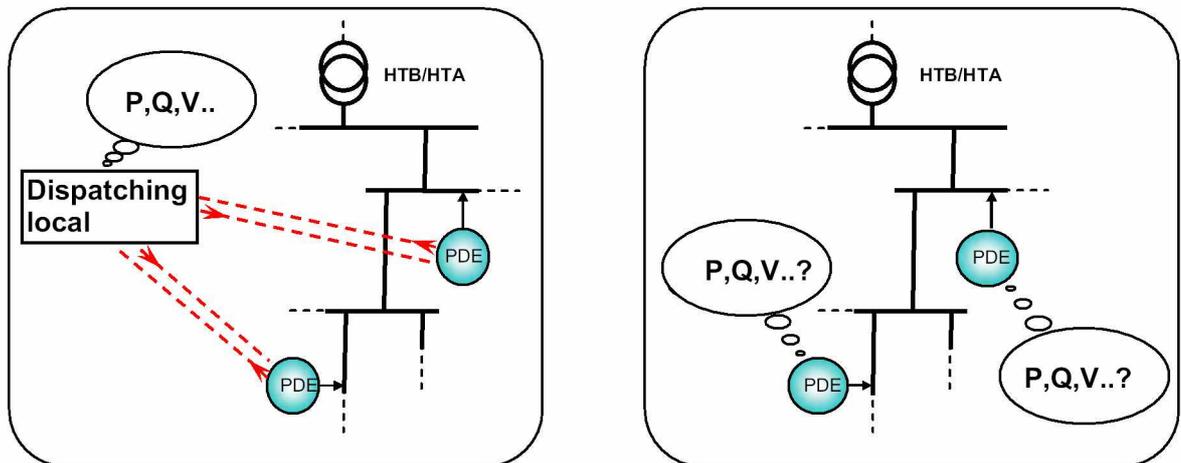


Figure (IV-3) : solutions envisagées pour le contrôle de la tension sur les réseaux de distribution

La première solution envisage donc une coordination des PDE. Chaque PDE est contrôlée en puissance ou en tension. Dans ce cas, chaque PDE doit être capable de communiquer avec un centre de dispatching centralisant les informations et, en fonction de celles-ci, à même de fournir les consignes en puissance ou en tension optimales pour chaque PDE. Ces systèmes de coordination optimale de production peuvent avoir des objectifs divers comme la réduction de pertes sur le réseau tout en conservant la tension dans les limites contractuelle ou encore la conservation du plan de tension [1]. Ces solutions calculant les possibilités de contrôles existants sur le réseau de transport restent cependant difficilement adaptables. En effet, une quantité significative de ces générations est difficilement observable ; la mise en place de moyen de télémesures et de communications est très onéreuse. De plus, ceci est envisageable dans le cas d'une mutualisation de moyen de production non envisagée dans cette thèse. [1]

Le deuxième axe de recherche pour le contrôle de tension, est d'embarquer dans chaque PDE un contrôle intelligent et autonome capable de réaliser une régulation locale pour une sauvegarde globale de la tension. Cette solution moins développée que la précédente, a l'avantage de se passer de communications lourdes à gérer et coûteuses. Ainsi le principe de ce contrôle est de réguler la PDE en puissance ou en tension en fonction du niveau de contraintes mesurées au point de connexion de la PDE [2].

Cette solution apporte des avantages économiques évidents puisque les communications entre PDE ou avec un centre de calcul de consignes ne sont pas envisagées. De plus le contrôle intelligent ainsi créé est indépendant des configurations du réseaux et donc transposable à n'importe quel cas de fonctionnement en terme de nombre de PDE connectées sur le départ considéré ou d'évolution de charge. [2]

## II.3. Modélisation et contrôle de productions décentralisées d'énergie :

### II.3.1. La problématique de modélisation :

Les PDE présentées précédemment peuvent être séparées en deux catégories, les PDE utilisant une génératrice synchrone (sans compter les machines asynchrones raccordées au réseau) comme les groupes diesel, ou les cogénérations classiques et les PDE interfacées au réseau par de l'électronique de puissance, comme les panneaux solaires, les piles à combustibles, les micro-turbines ou encore une fois, les éoliennes. [2]

Alors on va essayer de réaliser un contrôle original de PDE efficace pour maintenir la tension dans des limites contractuelles définies par le distributeur. Ainsi, en considérant les systèmes illustrés Figure (IV-4), l'accent sera mis lors de la modélisation sur le système à réguler ainsi que sur le système de régulation lui-même. [2]

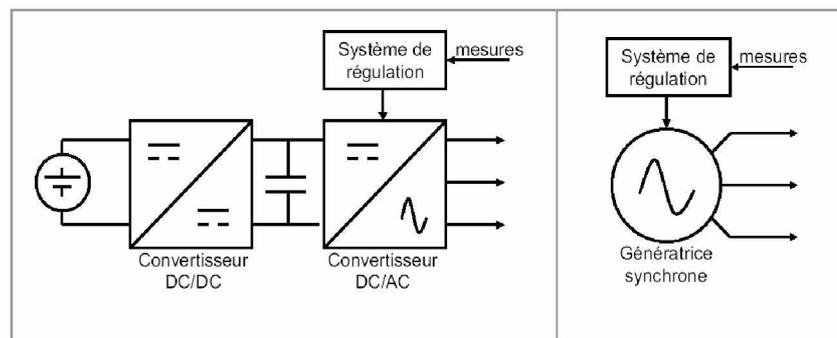


Figure (IV-4): Systèmes de PDE à modéliser

Ainsi les systèmes à réguler seront, selon le type de PDE considérées, soit un onduleur soit une génératrice synchrone.

Tout problème de modélisation fait l'objet d'un compromis entre la complexité et la rapidité. Compte tenu des applications envisagées, certaines hypothèses ont été retenues, afin de disposer de modèles permettant de réaliser des simulations relativement rapides tout en bénéficiant d'une certaine précision sur les résultats obtenus. [2]

### II.3.2. Modélisation de PDE utilisant un interfaçage d'électronique de puissance :

#### II.3.2.1. Présentation du système :

La modélisation de structure de production d'énergie interfacée par de l'électronique de puissance est un problème complexe [28]. En effet dans ce type de structure un grand nombre d'éléments entre en jeu comme la source primaire de puissance (PAC, panneaux solaire, éolienne...etc.), un étage hacheur permettant d'adapter la tension au bus continu, l'onduleur de tension et le contrôle commande de tout ce système. La structure d'électronique de puissance assurant la conversion DC/AC est un onduleur de tension triphasé. En faisant abstraction (dans un souci de simplification des schémas) des étages de filtrages et du transformateur situés entre la PDE et le réseau de distribution [2], le système est représenté Figure (IV-5):

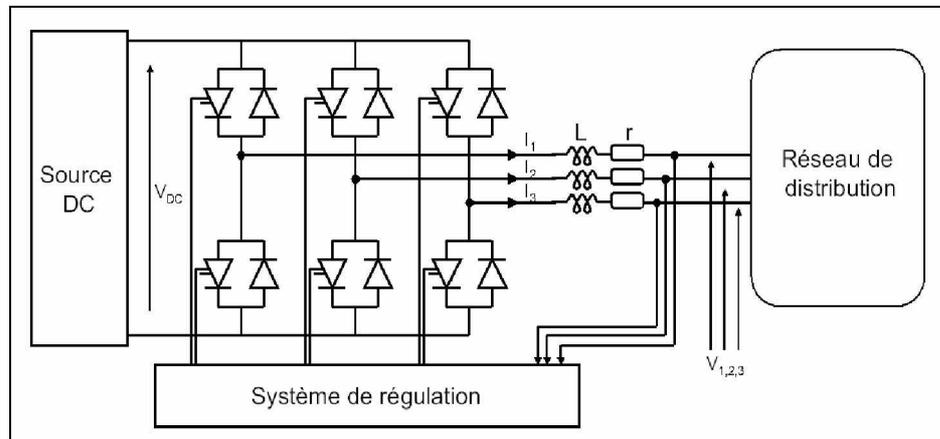


Figure (IV-5): Vision du système de production avec onduleur de tension

Les notions de contrôle « amont » et de contrôle « rapproché » peuvent être introduites. La Figure (IV-5) illustre la séparation du système de régulation, avec premièrement le contrôle « amont » capable de fournir des courants de consignes fonction de puissances désirées ou calculées pour (dans notre cas) réaliser un contrôle de tension locale. Vient ensuite le contrôle « rapproché » capable de fournir la commande de l'onduleur en fonction de l'erreur entre les courant injectes sur le réseau par celui-ci et les courants de consignes en sortie du contrôle « amont » [2].

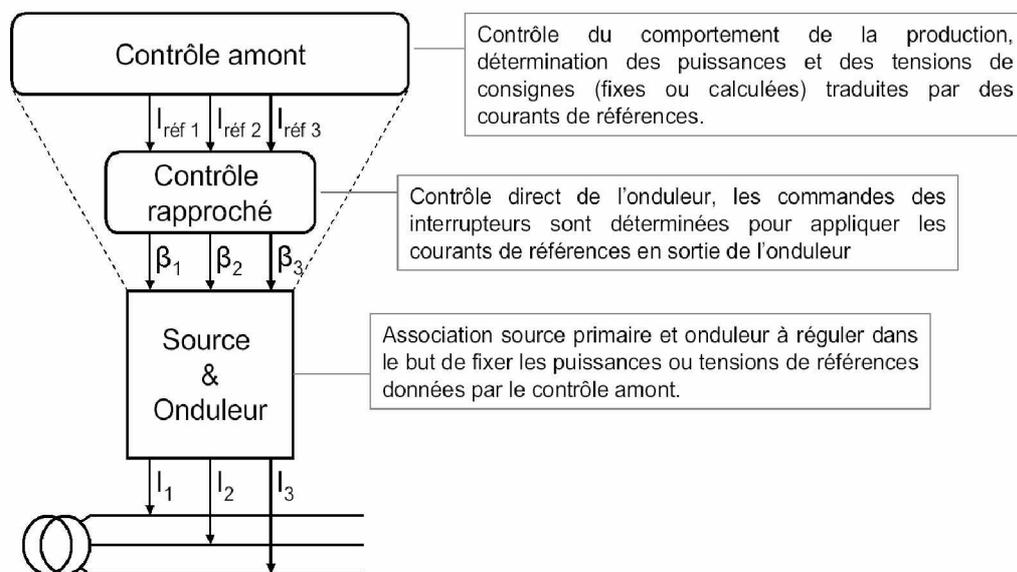


Figure (IV-5): Hiérarchisation des contrôles de l'onduleur de tension

Comme il a été expliqué dans les paragraphes précédents, le degré de modélisation d'un système est fonction des phénomènes à mettre en évidence. Ainsi, il va être nécessaire d'analyser le fonctionnement d'un tel système pour réaliser une modélisation de la production, illustrée Figure (IV-4), simple et adaptée à notre problématique de contrôle de la tension. La simplification de la modélisation va être faite d'une part au niveau des éléments de production mais également au niveau de leurs contrôles. [2]

Notre but est de réaliser des modèles simples, partant du postulat que l'association de la source primaire et de l'onduleur est considérée comme bien commandée, il est alors possible d'émettre l'hypothèse que le contrôle rapproché de l'onduleur fonctionne et est capable de fixer les courants de références directement en sortie de l'onduleur. En effet, l'étude de l'évolution de la

tension pourrait se faire en régime statique, ainsi les phénomènes transitoires trop rapide liés à la commutation des interrupteurs de l'onduleur et à son contrôle rapproché ne nous intéressent pas directement pour nos travaux. Fort de ces considérations, il est possible de simplifier la modélisation du système en prenant en compte uniquement le contrôle amont. Ceci est l'objet du paragraphe suivant [2].

### II.3.2.2. Hypothèses de modélisation :

#### II.3.2.2.a. Simplifications des dynamiques :

Afin de créer des modèles simples, plusieurs hypothèses sont faites sur la dynamique des différents éléments du système.

On considère que la dynamique des convertisseurs (onduleurs et hacheurs) est très rapide par rapport à la dynamique de l'élément de production. La dynamique retenue pour les convertisseurs est de l'ordre du dixième de seconde. Quant à la dynamique de l'unité de production, elle peut être de plusieurs secondes voire plusieurs minutes, selon le type de production considéré. Dans ces conditions, la seule dynamique à prendre en compte est celle du système le plus lent, à savoir la dynamique de l'onduleur pour la régulation de la puissance réactive ou la dynamique de l'unité de production pour la régulation de la puissance active. Pour rendre compte de ces dynamiques, des systèmes du premier ordre dont la constante de temps  $\tau$  est choisie de manière adéquate sont insérés au sein du système de régulation et de commande de l'onduleur, comme cela est illustré Figure (IV-7). [2]

#### II.3.2.2.b. Considération des limitations :

Les limitations considérées concernent uniquement l'élément de production et les convertisseurs

- Û L'élément de production fixe une limite en puissance active débitée,
- Û Les convertisseurs imposent une limite en amplitude du courant transite.

La puissance réactive produite ou absorbée par le système n'est donc limitée que par l'intermédiaire du courant maximal dans les convertisseurs.

En tenant compte des différentes remarques précédemment exposées, il est possible de proposer un schéma simplifié illustrant le principe général des systèmes de régulation que nous allons envisager Figure (IV-5). [2]

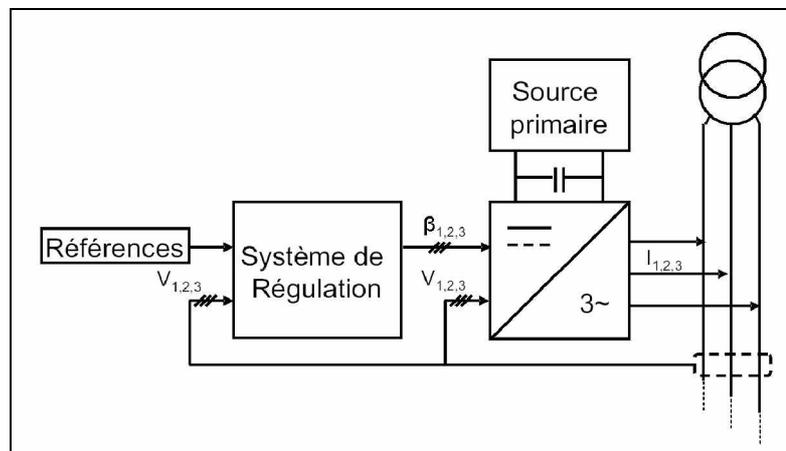


Figure (IV-6): Illustration du système complet par blocs fonctionnels.

Le principe de régulation mis en oeuvre nécessite un calcul dans le plan de Park afin de déterminer, à partir des consignes et des mesures effectuées au point de connexion, les courants à injecter. Cette réflexion a conduit à envisager une simplification de l'ensemble du système. Celle-ci consiste à faire abstraction de l'étage « onduleur - source DC », et à effectuer directement une transformée de Park inverse après calcul des composantes  $I_d$  et  $I_q$  dans la boucle de régulation, afin de disposer des courants triphasés à injecter sur le réseau. Cette approximation est valide dans la mesure où les aspects dynamiques et les limitations inhérentes à l'onduleur et à la source DC peuvent être pris en compte au sein même de la boucle de régulation. [2]

Le courant peut être directement limité en amplitude ou sur les valeurs  $I_d$  et  $I_q$  dans le plan de Park, situées en sortie de la boucle de régulation, et correspondant aux composantes du courant à injecter sur le réseau. Ces composantes sont visibles sur la Figure (IV-7). Les limitations pour la composante  $I_d$  sont choisies en fonction du courant maximal en sortie de l'onduleur et de la limitation en puissance de la source DC. Les limitations pour la composante  $I_q$  sont choisies en conséquence, de manière à ne pas dépasser la limitation en puissance réactive choisie en fonction d'un tangente phi limité généralement de 0,4. [2]

Cette simplification a conduit à une modélisation dite « modélisation simplifiée par injecteurs de courants », illustrée Figure (IV-7).

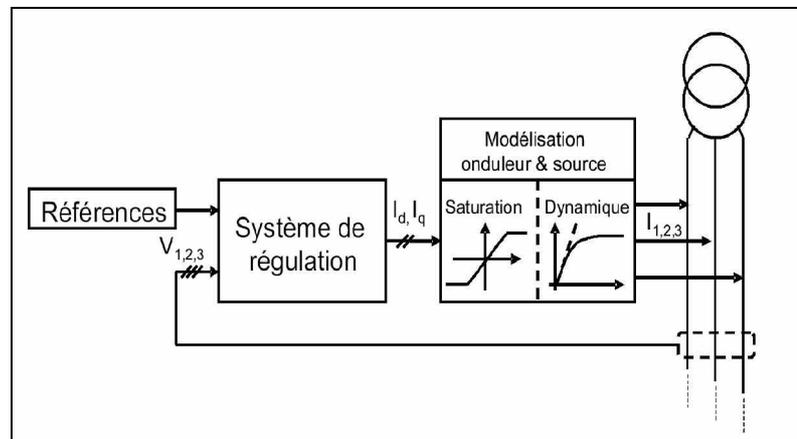


Figure (IV-7) : Modélisation simplifiée par injecteur de courant

Ainsi, les courants calculés à partir des références sont les courants injectés au réseau. La PDE et l'onduleur vont être modélisés par une limitation et un retard pour garder l'aspect dynamique de ceux-ci comme cela est visible sur la Figure (IV-7).

### II.3.2.3. Contrôle de production en puissance (P/Q):

#### II.3.2.3.a. Présentation du modèle : [2]

Fort des hypothèses simplificatrices, il va être présent possible de réaliser les modèles de PDE cohérents pour la visualisation de l'évolution de la tension suite à la connexion d'une PDE sur un réseau de distribution. Ainsi le premier contrôle est une régulation dite en P/Q, ou tangente phi. Le but de ce contrôle est d'imposer les puissances actives et réactives injectées, par la PDE, au noeud de connexion. La Figure (IV-8) illustre le système global à commander.

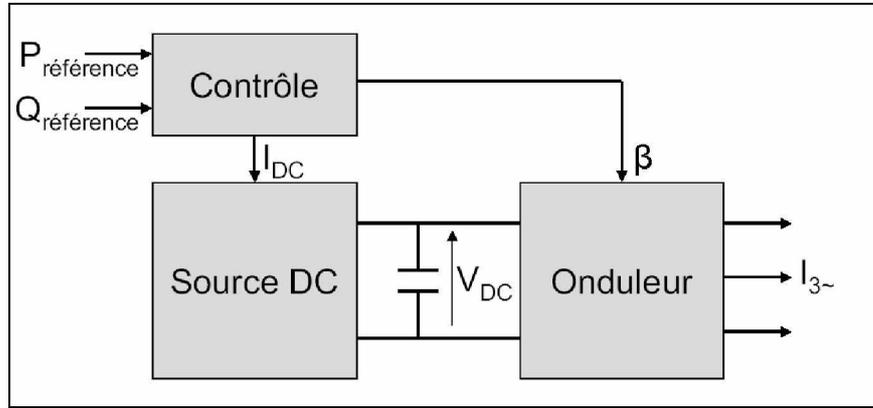


Figure (IV-8): Contrôle en puissance (P/Q)

Les différentes simplifications réalisées après analyse du système nous ont permis de conclure que les courants de consignes en sortie du contrôle amont seront injectés au point de connexion de la PDE. Ces courants sont calculés grâce aux références de puissances et à la mesure de tension au point de connexion ; ceux-ci vont être calculés dans le référentiel de Park.

Soit:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{3}{2}(V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q) \\
 Q &= \frac{3}{2}(V_q \cdot I_d - V_d \cdot I_q)
 \end{aligned}
 \quad \dots\dots\text{IV-3}$$

On en déduit

$$\begin{cases}
 I_d = \frac{2(P \cdot V_d + Q \cdot V_q)}{3(V_d^2 + V_q^2)} \\
 I_q = \frac{2(P \cdot V_q - Q \cdot V_d)}{3(V_d^2 + V_q^2)}
 \end{cases}
 \quad \dots\dots\dots\text{IV-4}$$

\_Où P et Q sont les puissances de référence de la PDE.

\_V<sub>d</sub> et V<sub>q</sub> sont les composantes directe et quadratique de la tension, mesurée au point de connexion de la PDE, dans le référentiel de Park.

\_I<sub>d</sub> et I<sub>q</sub> sont les composantes directes et quadratique du courant produit par la PDE sur le réseau ou elle est connectée.

Ces courants dépendent donc des puissances demandées ainsi que de la tension mesurée au point de connexion de la production. Cette tension mesurée est transformée dans le référentiel de Park avant le calcul des courants. Ceci est illustré Figure (IV-9).

Une boucle à verrouillage de phase ou PLL (Phase Locked Loop) est utilisée pour synchroniser la transformation de Park sur la pulsation de la tension mesurée sur le réseau. Ainsi, lorsque le système est dans un régime établi, la composante directe V<sub>d</sub> en sortie de la transformation de Park est une image de l'amplitude de la tension mesurée, et la composante quadratique V<sub>q</sub> est nulle. Ainsi, les équations (IV-4) font apparaître I<sub>d</sub> comme une image directe de la puissance active et I<sub>q</sub> comme une image de la puissance réactive.

D'après ces hypothèses le schéma de commande peut être modélisé comme suit :

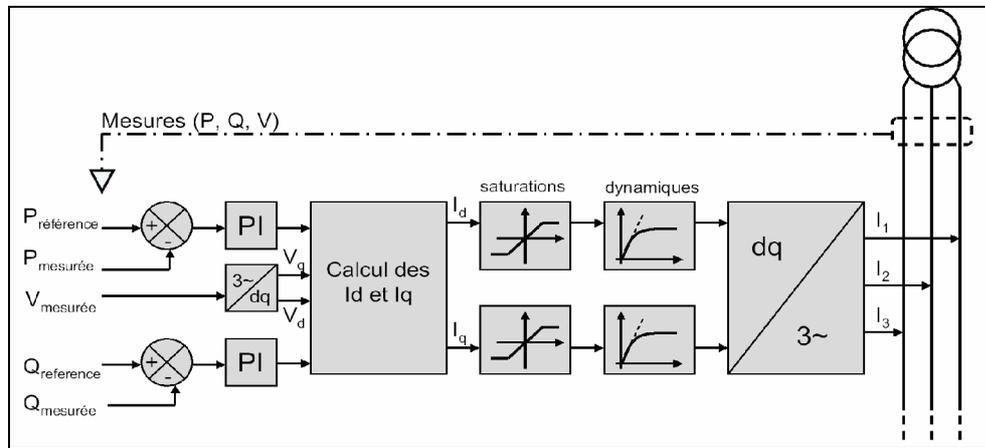


Figure (IV-9): Production contrôlée en puissance

Comme il a été expliqué précédemment, la source primaire et l'onduleur sont modélisés par un retard et une limitation. Deux correcteurs Proportionnel Intégral (PI) sont en charge de réguler les puissances actives et réactives à leur valeur de consigne. Les limitations et les dynamiques du système sont traduites sur les courants  $I_d$  et  $I_q$ , ces signaux sont ensuite traités par une transformation de Park inverse à la même pulsation que celle utilisée pour la transformation de la mesure en tension. Enfin ces courants, traduisant les puissances à commander, sont injectés sur le réseau au point de connexion de la PDE.

L'étude, au sens automatique du terme, de ce système va se faire en séparant la boucle de régulation de la puissance active de la boucle de régulation de la puissance réactive. Le dimensionnement des correcteurs étant similaire pour ces deux boucles de puissance active et réactive, seule l'étude de la boucle de puissance active sera développée.

En considérant que le référentiel de Park choisi tourne à la pulsation de la tension, alors il est possible de fixer  $V_q=0$  et  $V_d=V_{max}$ . De plus en considérant que  $V_d$  bouge très peu il est possible de simplifier la régulation de puissance active comme suit :

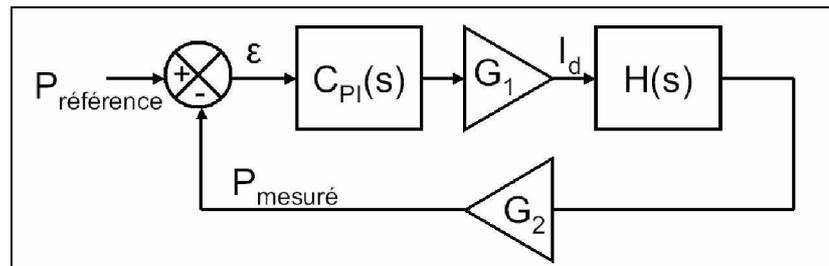


Figure (IV-10): Boucle de régulation de la puissance active.

Avec  $\epsilon$  la différence entre la puissance de consigne et la puissance mesurée.

$G_1$  la simplification de l'équation (IV-4) en considérant  $V_q=0$  et  $V_d$  comme constant.

$$\text{Avec : } G_1 = \frac{2}{3.V_d} \text{ et } G_2 = \frac{1}{G_1} = \frac{3.V_d}{2}$$

$H(s)$  est la modélisation de la dynamique de l'onduleur.

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau_s s} \dots\dots\dots \text{IV-5}$$

Le correcteur est de la forme d'un PI classique donné par la formule (IV-6) :

$$C_{PI}(s) = \frac{k_p \cdot s + k_i}{s} \dots\dots\dots \text{IV-6}$$

Où  $k_p$  est le coefficient proportionnel et  $k_i$  le coefficient intégral du correcteur.

Ainsi, les coefficients des correcteurs vont être dimensionnés de telle façon que la dynamique du système sera conservée ; cette dynamique traduit le temps de réponse de l'onduleur.

Soit la fonction de transfert du système en boucle fermée Figure (IV-10)  $F_{BF}(s)$  sous la forme de la fonction transfert du second ordre (IV-7).

$$F_{BF}(s) = \frac{N(s)}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2} = \frac{C_{PI}(s) \cdot G_1 \cdot H(s)}{1 + C_{PI}(s) \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot H(s)} = \frac{G_1 \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{1 + \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot G_1 \cdot G_2} \cdot s + \frac{\tau}{k_i \cdot G_1 \cdot G_2} \cdot s^2} \dots\dots IV-7$$

Ainsi  $\left\{ \begin{array}{l} \omega_n^2 = \frac{k_i \cdot G_1 \cdot G_2}{\tau} \\ 2\xi = \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot G_1 \cdot G_2} \end{array} \right. \dots\dots IV-8$

En fixant la pulsation de coupure a  $\omega_n = \frac{1}{\tau}$  pour conserver la dynamique de l'onduleur et  $\xi=1$  pour ne pas avoir de dépassement, les paramètres des correcteurs pourront donc être fixes grâce aux expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} k_i = \omega_n \\ k_p = 2\xi - 1 \end{array} \right. \dots\dots IV-9$$

La même étude peut être réalisée pour la boucle de puissance réactive, les résultats et les conclusions sur les coefficients de corrections étant identiques aux précédents, ceux-ci ne sont pas développés.

**II.3.2.4. Contrôle de production en puissance active et tension (P/V) :**

**II.3.2.4.a. Présentation du modèle : [2]**

Pour ce modèle, le schéma de principe est pratiquement le même que pour la régulation P/Q ; seul le contrôle du courant  $I_q$  diffère.

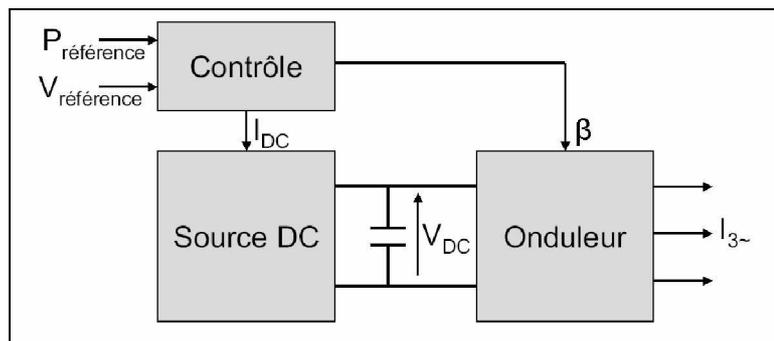


Figure (IV-12): Contrôle en puissance active et tension (P/V)

En effet, le but n'est plus de commander en puissance mais de contrôler la tension ainsi que la puissance active au noeud de raccordement.

Pour régler la tension en ce point, nous allons nous servir de la définition de la variation de tension sur le réseau due au transit de puissance, vue dans le paragraphe II.3.2.2.a.

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V} \dots\dots IV-10$$

Il va donc être possible de régler V en agissant sur la puissance réactive et ainsi créer une variation de tension positive ou négative permettant d'atteindre la valeur de consigne  $V_{référence}$ .

Dans ce modèle, seule la puissance réactive règle la tension. En effet, la puissance active pourrait jouer le même rôle que la puissance réactive, surtout dans les réseaux BT où la résistance linéique est plus conséquente que sur les réseaux de niveau de tension plus élevé. Cependant, pour un modèle P/V la puissance active est un paramètre à régler, on ne peut donc pas s'en servir pour régler la tension.

La simplification du modèle P/V est réalisable en effectuant les mêmes hypothèses que celles utilisées pour simplifier le modèle P/Q. Comme précédemment, la source primaire et l'onduleur vont être modélisés par des limitations et des dynamiques.

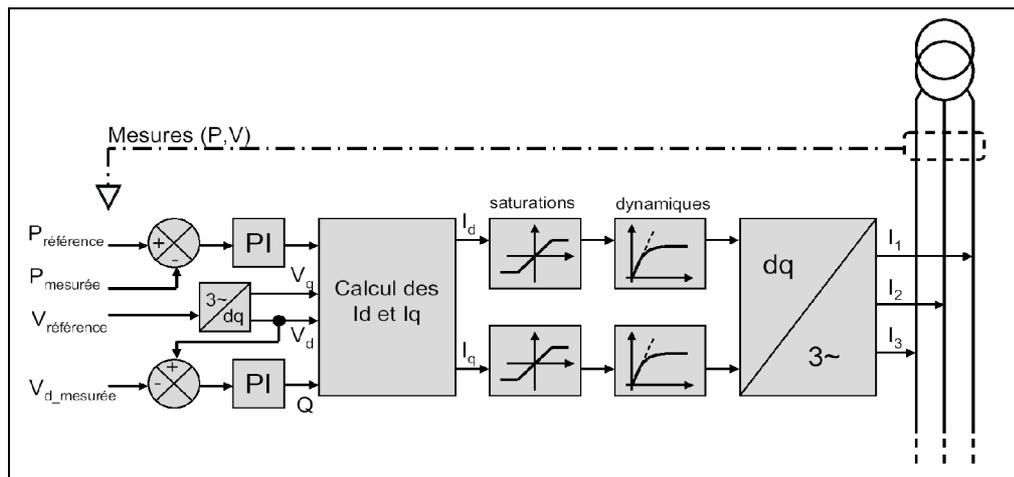


Figure (IV-13) : Production contrôlée en puissance active et en tension

La boucle de contrôle de puissance réactive est remplacée par une boucle de contrôle sur la tension. La différence entre l'amplitude de la tension de référence et celle mesurée sur le réseau est traduite, par le correcteur PI, en une quantité de puissance réactive à absorber ou à fournir. Si la tension mesurée est en dessous de la consigne de tension, le système va donc produire plus de puissance réactive ce qui aura pour effet d'augmenter la tension. Inversement, si la tension est trop élevée la puissance réactive injectée sera diminuée. Ainsi, en restant dans les limitations internes au modèle, il va être possible de contrôler la tension ainsi que la puissance active en un point du réseau.

Ici encore le problème de dimensionnement des correcteurs peut être séparé en deux avec d'une part la boucle de régulation en puissance active et de l'autre la boucle de régulation de tension. Les conclusions relatives au dimensionnement du correcteur en charge de la puissance active sont les mêmes que celles obtenues pour les modèles P/Q.

La boucle de régulation de tension peut être modélisée comme suit :

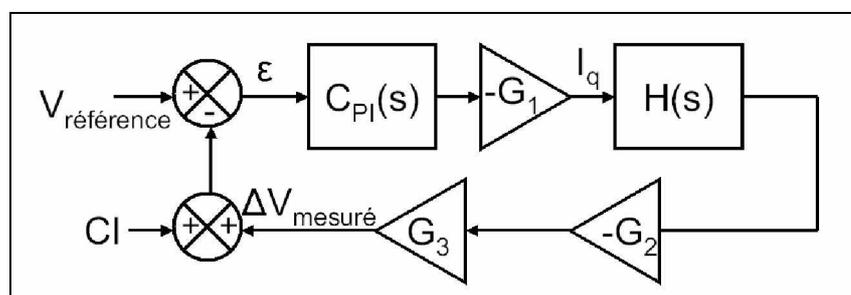


Figure (IV-14): Boucle de régulation de la tension.

Les gains  $G_1$  et  $G_2$  et les fonctions  $C_{PI}(s)$  et  $H(s)$  sont les mêmes que ceux définis pour la Figure (IV-10). Le gain  $G_3$  traduit l'impact de la puissance réactive sur la tension, via l'inductance linéique  $X$ .

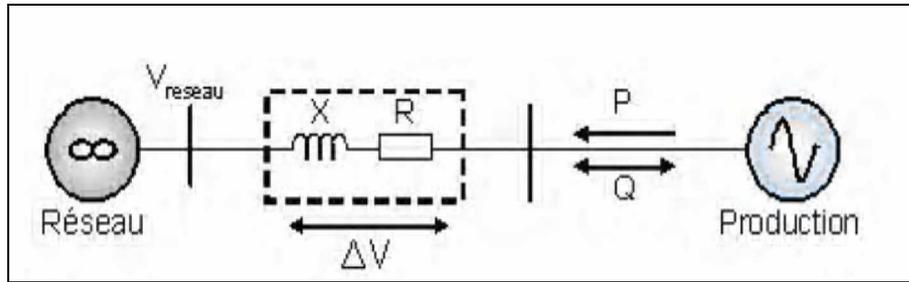


Figure (IV-15): Représentation de l'inductance X intervenant dans l'expression de G3.

Dans cette étude seul l'impact de la puissance réactive sur la tension nous intéresse. Le gain  $G_3$  est donc égale à  $X/V$  ou  $X$  représente la partie inductive de la ligne représentée Figure (IV-15). Ainsi, la variation de tension due à la production où à l'absorption de puissance réactive est obtenue, dans la boucle de régulation, en sortie de ce gain. Il faut y ajouter les conditions initiales de tension pour obtenir finalement une image de la tension mesurée.

Les spécifications du contrôle désire sont les mêmes que pour la boucle de régulation de puissance, les dépassements vont être évités tout en conservant la dynamique du système modélisé.

Ainsi, dans le but de caractériser les paramètres  $k_p$  et  $k_i$  du correcteur de la boucle Figure (IV-14), la fonction de transfert en boucle fermée peut être donnée sous la forme d'un second ordre:

$$F_{BF}(s) = \frac{N(s)}{1 + \frac{2\xi}{\omega_n} \cdot s + \frac{1}{\omega_n^2}} = \frac{G_1 \cdot (k_p \cdot s + k_i)}{1 + \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot G_3} \cdot s + \frac{\tau}{k_i \cdot G_3 \cdot G_1 \cdot G_2} \cdot s^2} \dots\dots\dots \text{IV-11}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \omega_n^2 = \frac{k_i \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot G_3}{\tau} \\ \frac{2\xi}{\omega_n} = \frac{G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \cdot k_p + 1}{k_i \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot G_3} \end{cases} \dots\dots\dots \text{IV-12}$$

Maintenant les paramètres  $k_p$  et  $k_i$  peuvent être calculés en fixant  $\omega_n = \frac{1}{\tau}$  et  $\xi = 1$ .

$$\begin{cases} k_i = \frac{1}{G_3 \cdot \tau} = \frac{V_d}{X \cdot \tau} \\ k_p = \frac{2\xi - 1}{G_3} = \frac{(2\xi - 1) \cdot V_d}{X} \end{cases} \dots\dots\dots \text{IV-13}$$

### II.3.3. Modélisation de PDE de type génératrice synchrone :

#### II.3.3.1. Présentation du système : [2]

De la même façon que pour la modélisation précédente, plusieurs éléments peuvent être identifiés dans ce type de production. En effet, la Figure (IV-17) schématise la constitution de ce type de PDE composée d'une part par un système d'entraînement de type moteur thermique ou encore un entraînement par pales d'éolienne et d'autre part par une génératrice synchrone.

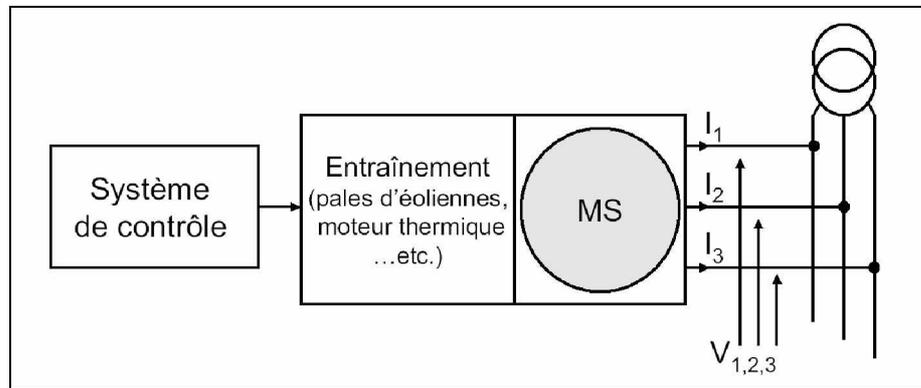


Figure (IV-17): Vision globale du système de production avec génératrice synchrone.

La modélisation de telles PDE est moins problématique que la modélisation de productions interfacées via de l'électronique de puissance. Ainsi nos réflexions sur la modélisation de tout le système ainsi que les hypothèses à poser vont se concentrer sur la façon de représenter le moyen de production ainsi que le système de contrôle de l'ensemble.

### II.3.3.2. Hypothèses de modélisation :

#### II.3.3. 2.a. Simplifications des dynamiques : [2]

Les hypothèses réalisées vont être sensiblement les mêmes que celles faites pour modéliser le système précédent. En effet, nous allons traduire le comportement du système de production par ses caractéristiques dynamiques ainsi que par des limitations.

La dynamique du système retenue est, la plus lente c'est-à-dire celle du moyen de production pour la puissance active. La puissance réactive ne dépend elle que du temps de réponse de la génératrice synchrone et de la dynamique du système de régulation. Ainsi des constantes de temps du premier ordre traduisant ces dynamiques sont insérées dans la boucle de régulation des modèles.

#### II.3.3. 2.b. Considération des limitations : [2]

Le but étant de réaliser des modèles simples, sans modèle physique du système d'entraînement (moteur thermique, éolienne, etc.) représenté Figure (IV-17), il est important de connaître les limitations du système qui ici seront traduites en puissance,

- L'élément de production fixe une limite en puissance active débitée,
- L'alternateur synchrone fixe une limitation en puissance réactive débitée via une limitation de tension d'excitation.

En effet, le fait d'agir sur l'excitation de la machine modifie la quantité de puissance réactive échangée avec le réseau. Ainsi une surexcitation de celle-ci va traduire une injection de puissance réactive et inversement une sous excitation de la génératrice va induire une absorption de puissance réactive. Une limitation d'excitation équivaut à une limitation de puissance réactive.

Grâce aux hypothèses précitées, il est possible de simplifier le système de production, ses limitations sont retranscrites dans la boucle de régulation et le système de production est modélisé par ses dynamiques et ses limitations en puissance fournie. La Figure (IV-18) représente donc le système final modélisé.

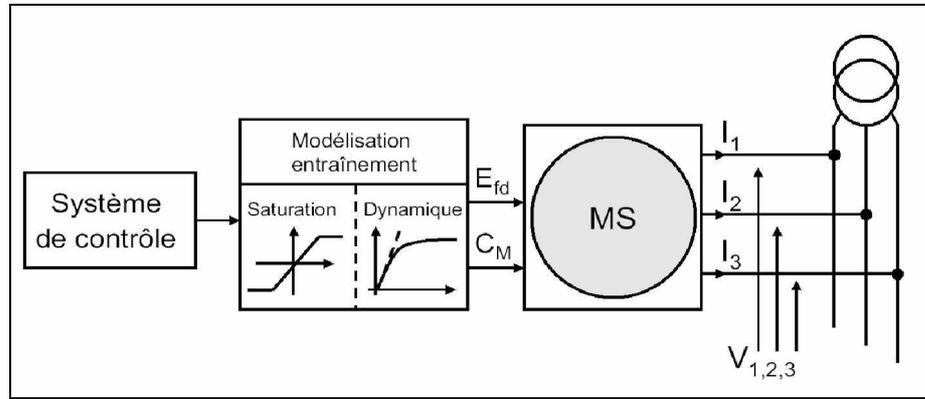


Figure (IV-18): vision simplifiée du système de production

Les commandes de la machine sont donc la tension d'excitation pour le contrôle de puissance réactive ou de tension au noeud de connexion de la PDE ainsi qu'une référence de couple mécanique traduisant une puissance active de consigne.

### II.3.3. 3. Modèle de contrôle de production en puissances (P/Q) :

#### II.3.3. 3.a. Présentation du modèle : [2]

Comme pour les régulations précédemment exposées, les hypothèses réalisées permettent de créer les modèles de régulation désirés en puissance et en tension. Ainsi, il est possible de réguler en puissances active et réactive. La Figure (IV-19) expose la modélisation d'un contrôle en puissance d'une telle PDE.

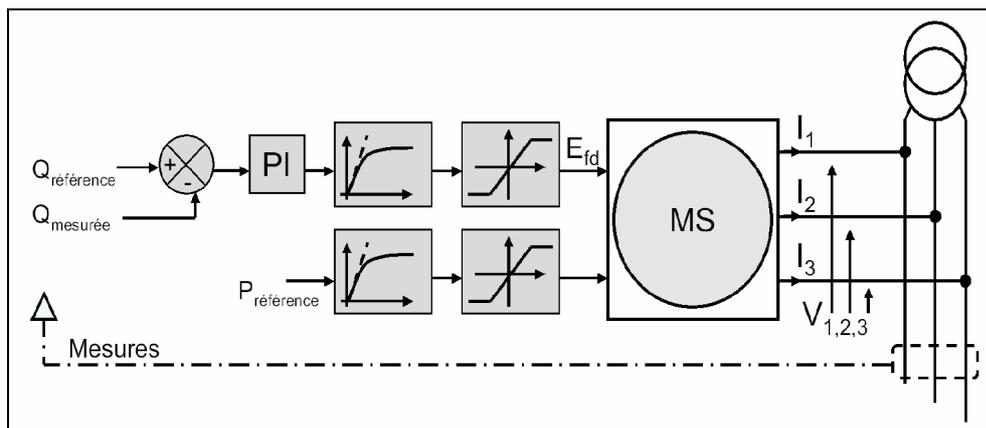


Figure (IV-19): Modèle de production contrôlée en puissances

Ainsi, la source de production est retranscrite par une limitation et une dynamique en puissance active, le modèle permet de fixer la consigne d'entrée en puissance directement en sortie de la génératrice. Ainsi, nous n'avons pas ajouté de régulation supplémentaire. Les limitations relatives à la machine synchrone se retrouvent sur la boucle de régulation en puissance réactive. La différence entre la puissance réactive de consigne et celle mesurée est traduite en commande via la tension d'excitation par un correcteur de type PI.

**II.3.3.4. Modèle de contrôle de production en puissance active et tension (P/V):**

**II.3.3.4.a. Présentation du modèle : [2]**

Ce contrôle revient à réaliser une régulation classique de tension (de type AVR) pour le contrôle de machines synchrones.

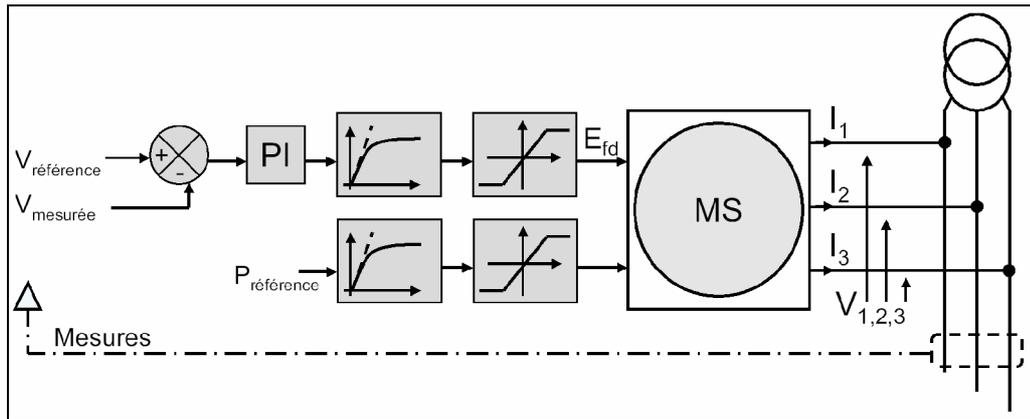


Figure (IV-21): Modèle de production contrôlée en puissance active et en tension

Ainsi, la modélisation du système de production s’effectue grâce aux limitations et aux dynamiques exposées précédemment. Le contrôle de la tension se fait via la tension d’excitation de la machine. D’après la formule (IV-10), surexciter ou sous exciter la génératrice a pour effet de respectivement augmenter ou abaisser la tension au noeud de connexion de la PDE.

**II.4. Développement du régulateur adaptatif de tension :**

**II.4.1. Problématique du contrôle local de tension : [2]**

Il a été mis en avant, l’intérêt de développer des contrôles efficaces de PDE pour pallier les problèmes induits par leur connexion au réseau. En effet, dans le cadre d’une insertion massive de petites productions il est possible, et dans certain cas nécessaire, de faire participer ces mêmes productions au réglage de tension.

Pour cela, il a été exposé deux types de contrôles existants, le premier régulant les puissances injectées au point de connexion de la PDE, le second régulant la puissance active ainsi que la tension via un contrôle en puissance réactive.

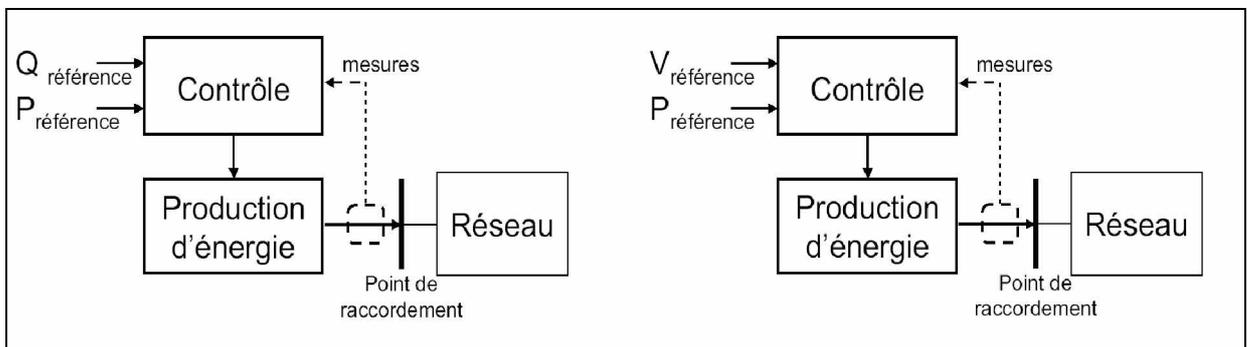


Figure (IV-23): Système de régulation de PDE à disposition.

Ainsi, les PDE disposées sur une partie du réseau peuvent participer au réglage de tension, cependant certaines questions se posent:

- § Qui décide de changer les valeurs de consigne de ces PDE?
- § De combien? (La quantité nécessaire pour ramener la tension dans les limites admissibles)
- § Quand et combien de temps? (Le moment et la durée de changement)
- § Où? (Quelles PDE ?)

Telles sont les problématiques d'un contrôle de tension sur le réseau de distribution à l'aide de PDE. Le contrôle existant du réseau de transport réalise sa fonction de réglage en coordonnant les productions, celui-ci calcule les consignes de puissances de chaque groupe de manière optimale en fonction d'informations mesurées. Un tel système de contrôle peut être pensé pour le cas de la distribution, cependant celui-ci peut s'avérer difficile à mettre en place de par la multitude et la nature sporadique des productions. De plus, une quantité significative de PDE de petite puissance n'est en général ni observable, ni dispatchable. Ainsi, les stratégies de contrôle de type centralisé, utilisant des communications entre les PDE et le gestionnaire du réseau sont difficilement réalisables à cause de contraintes techniques et financières. En effet, cela augmenterait sensiblement le coût de raccordement du a l'intégration supplémentaire des équipements de mesure et de communication.

Notre approche du contrôle de tension sera donc locale, c'est-à-dire n'utilisant aucune communication pour une coordination entre PDE. Ainsi, nous nous sommes focalisés, dans un premier temps, sur le problème de surtension vu de la PDE, c'est-à-dire au noeud de connexion de la production. En effet, si il est possible de contrôler la PDE efficacement, il peut être possible d'effacer le problème de tension engendré par celle-ci.

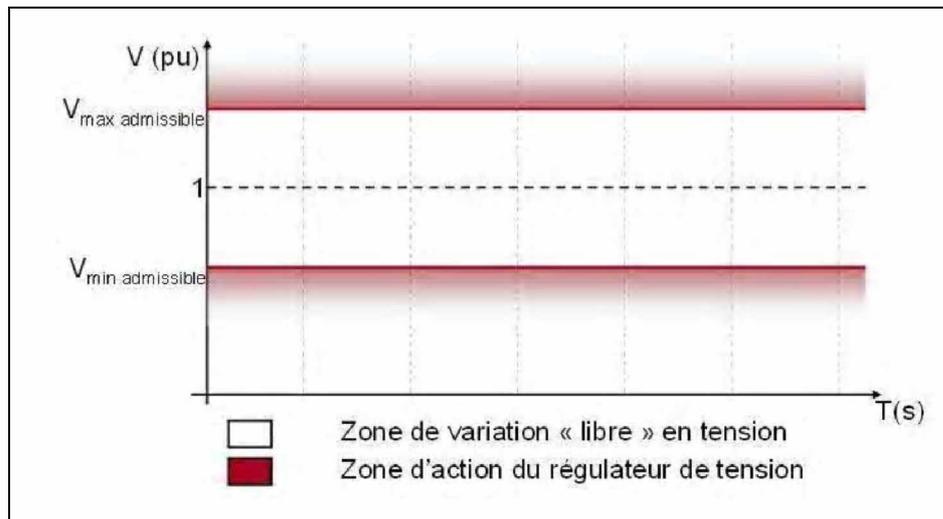


Figure (IV-24): définition des zones d'action.

La Figure (IV-24) présente le principe de fonctionnement de la première approche du contrôle. Sur les réseaux de distribution des limites contractuelles sont fixées ( $\pm 5\%$  en HTA -10% +6 % en BT), le gestionnaire s'engage à maintenir, en moyenne, la tension du réseau dans cette fenêtre. Pour cela, la stratégie de régulation adoptée est de produire des puissances de consigne tant que la tension mesurée au noeud de connexion de la PDE ne sort pas de la fenêtre contractuelle et, de réguler la tension pour la conserver au niveau des limites admissibles dans le cas contraire. Ainsi, les contrôles développés en puissance et en tension vont nous servir de base pour réaliser ce type de régulation. Ces contrôles vont être hybrides pour réaliser un régulateur en puissances de type P/Q capable de basculer le contrôle en tension de type P/V en fonction de contraintes sur les niveaux de tension.

### II.4.2. Régulateur adaptatif de tension : [2]

Le régulateur adaptatif est réalisé pour effacer les surtensions locales. Ainsi, un contrôle capable de basculer automatiquement d'un mode de régulation P/Q, utilisé lorsque le plan de tension se trouve entre les limites autorisées (fenêtre d'admissibilité), à un mode de régulation P/V utilisé lorsque la tension doit être corrigée, doit être réalisé.

Le principe va être de détecter les niveaux de tension et, lorsque cela s'avère nécessaire, d'agir sur la puissance réactive fournie pour ajuster la tension. Un premier modèle de correcteur adaptatif va être développé, en intégrant la boucle de tension du modèle P/V dans le modèle P/Q.

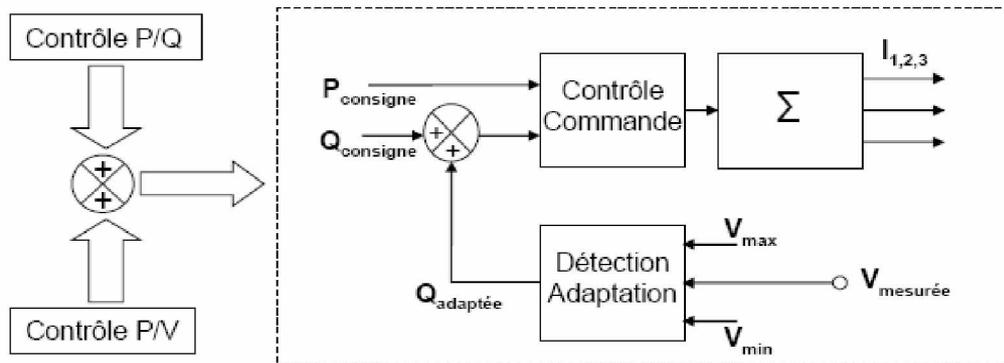


Figure (IV-25): Hybridation des modèles P/V et P/Q amenant le contrôle adaptatif

#### II.4.2.a. Principe de fonctionnement du correcteur adaptatif : [2]

Le régulateur à réaliser se trouve dans la fonction « Détection Adaptation » de la Figure (IV-25). Ce contrôle est défini comme contrôle « amont », c'est-à-dire celui qui définit le comportement de la PDE. Ainsi, lorsqu'une régulation de tension est nécessaire le système de régulation agit sur la valeur de puissance réactive de consigne à produire ou absorber par la PDE.

Le fonctionnement du système est celui du modèle de régulation en puissance (P/Q) auquel une boucle de correction de consigne de puissance réactive est ajoutée. Cette boucle de réaction est très similaire à la boucle de régulation de tension du modèle P/V, à la différence près que l'objectif n'est plus une consigne fixe mais une fenêtre de tension à ne pas dépasser. Ainsi, les problèmes de régulation et de détection de tensions critiques vont être scindés en deux, avec d'un côté un correcteur régulant les tensions hautes et de l'autre un correcteur régulant les tensions basses.

Grâce à cette vision du problème, il est désormais possible de réaliser deux boucles de contrôle indépendantes, sur le même schéma qu'une boucle de tension classique. Prenons le cas du correcteur de tensions hautes Figure (IV-26).

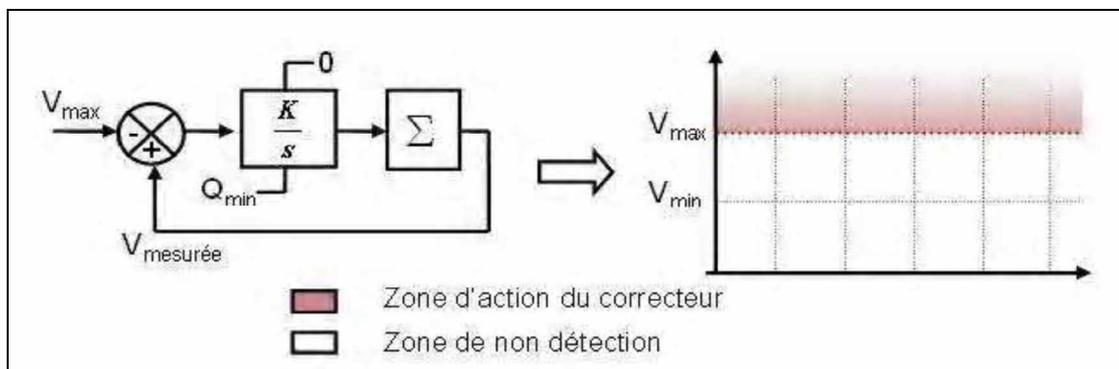


Figure (IV-26) : Boucle de régulation en charge du contrôle des tensions hautes.

Les correcteurs illustrés Figure (IV-26) et Figure (IV-27) traduisent une erreur de tension en quantité de puissance réactive à produire ou à absorber. Cependant, ce correcteur est limité de telle façon qu'il ne peut que fournir une consigne de puissance réactive négative. Par ce principe, ce correcteur n'agit que lorsque la tension dépasse la limite haute  $V_{\max}$ . Ainsi, la fonction détection et adaptation est réalisée pour les cas de surtensions.

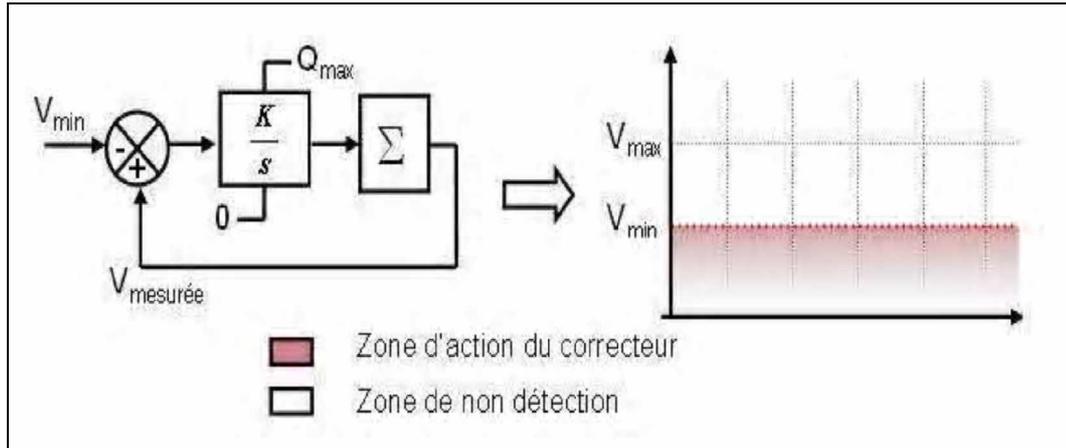


Figure (IV-27) : Boucle de régulation en charge du contrôle des tensions basses

De la même façon, un correcteur et allié à une limitation régule les tensions basses. Les valeurs autorisées en sortie de ce régulateur sont des valeurs de puissance réactive positive.

L'action conjointe de ces deux branches de régulation réalise la fonction désirée de basculement de régulation de puissances à une régulation en tension (Figure (IV-25)).

Le système dans sa globalité a deux boucles imbriquées, la boucle de détermination de la consigne en puissance réactive du bloc « détection adaptation », ainsi qu'à l'intérieur de celle-ci la boucle de régulation de puissance réactive du bloc « contrôle commande » de la Figure(IV-25). Cette dernière a déjà été illustrée dans le chapitre II lors de la présentation des modèles de régulations P/Q. Pour éviter de rendre tout ce système instable la boucle de régulation de puissance doit être plus rapide que la boucle de détermination de puissance réactive. Ainsi, sachant que la dynamique de la première boucle est dimensionnée pour être celle de l'onduleur, la dynamique de la boucle de détermination de la puissance réactive sera deux fois plus lente.

#### II.4.2.b. Test du régulateur adaptatif de tension :

Le régulateur adaptatif étant développé, ce système doit être capable de s'adapter aux contraintes du réseau et de réaliser une fonction de contrôle de tension locale. Les performances et les limites d'un tel contrôle doivent donc être testées. Ainsi, dans ce paragraphe, deux contrôles vont être comparés, un premier en tangente phi, puis le contrôle adaptatif sur le même scénario. [2]

Ce scénario est réalisé sur le réseau avec 17 noeuds présenté sur la Figure (IV-28). Pour une bonne illustration des performances ainsi que des limites de tels régulateurs un taux d'insertion de 75% est simulé. En effet, un tel taux de pénétration va engendrer des surtensions locales aux points de connexion des productions dont certaines vont dépasser les limites admissibles de tension.

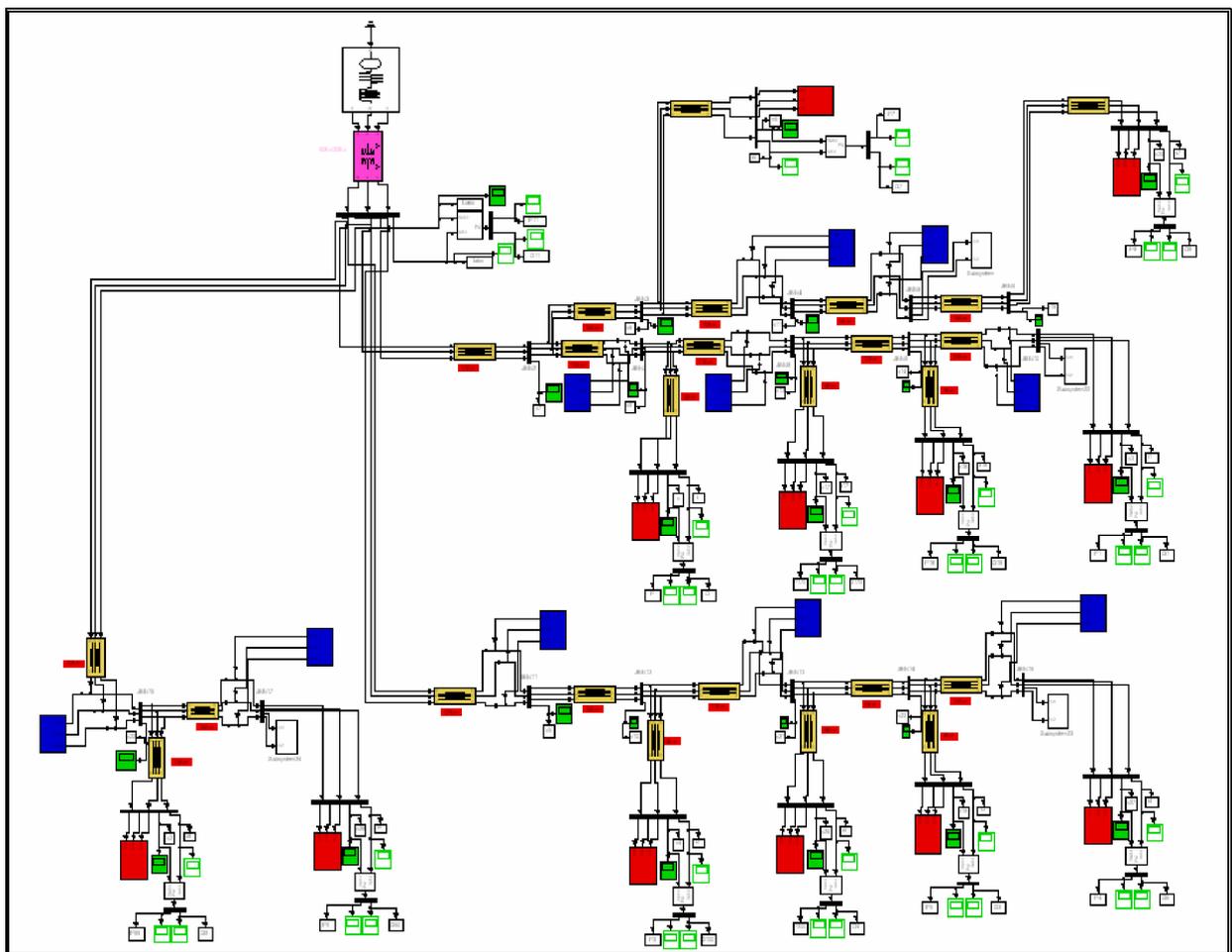
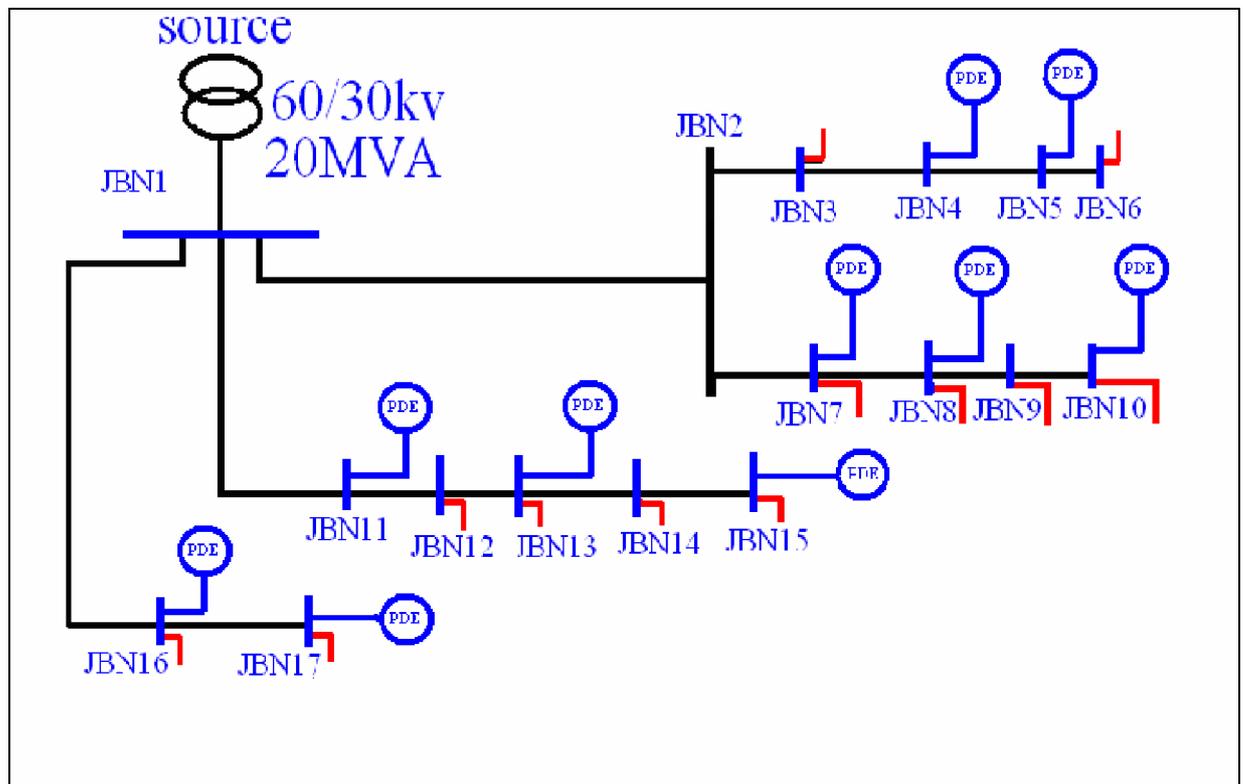


Figure (IV-28) : Réseau HTA avec 10 PDE connectées.

La Figure (IV-28) présente la configuration du réseau envisagée dans le scénario suivant :

§ Changement de charge à partir de :

- $t=0.35s$  :  $\Delta S_{charge}= 20\%$  ;
- $t=0.40s$  :  $\Delta S_{charge}= 40\%$  ;
- $t=0.50s$  :  $\Delta S_{charge}= -35\%$  ;
- $t=0.60s$  :  $\Delta S_{charge}= -50\%$  ;
- $t=0.75s$  :  $\Delta S_{charge}= 0\%$  ;

§ Changement de consigne de production des PDE successif toutes les 0.05s de  $t=0.30s$  à  $t=0.75s$ . Les PDE passent d'une production de 0.2MW à 1.5MW.

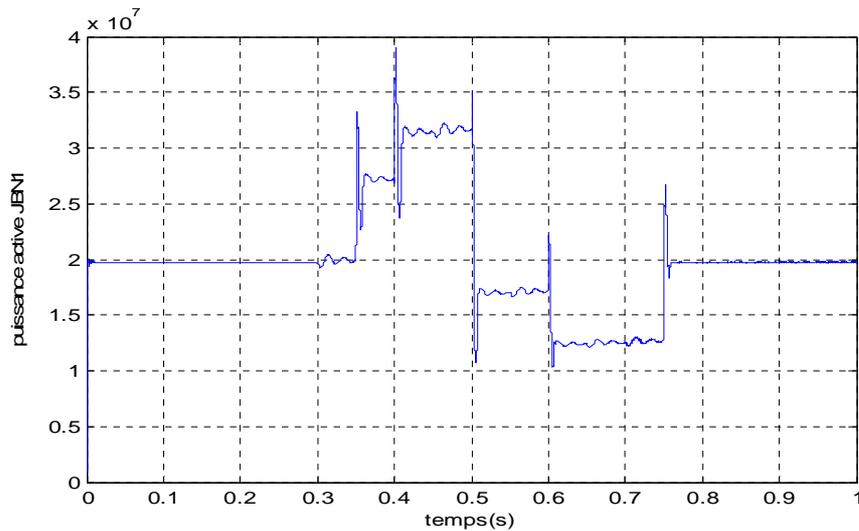


Figure (IV-29): Transit de puissance active dans le JBN1 pour le scénario défini.

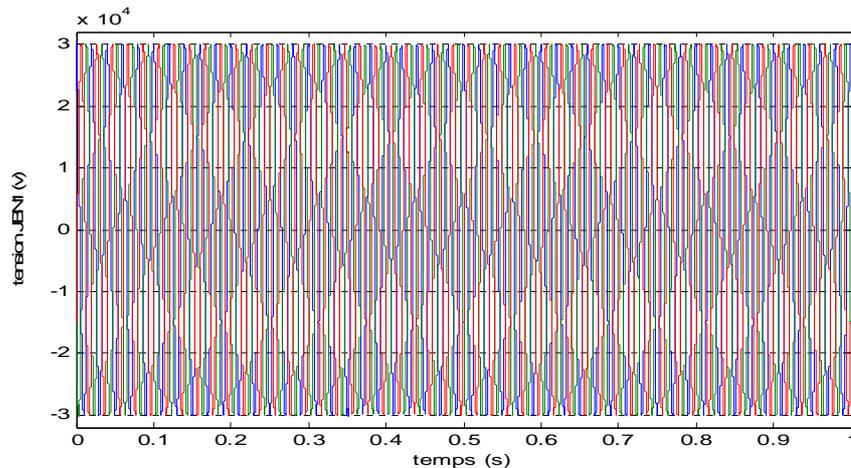


Figure (IV-30.a): Transit de tension dans JBN1 pour le scénario défini.

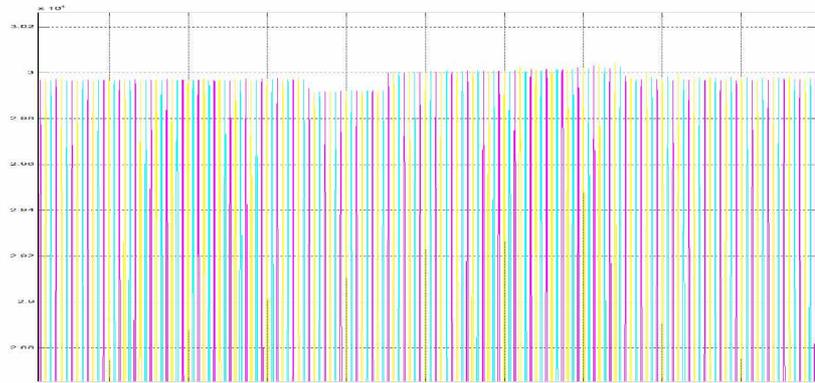


Figure (IV-30.b): Zoom de transit de tension dans JBN1 pour le scénario défini.

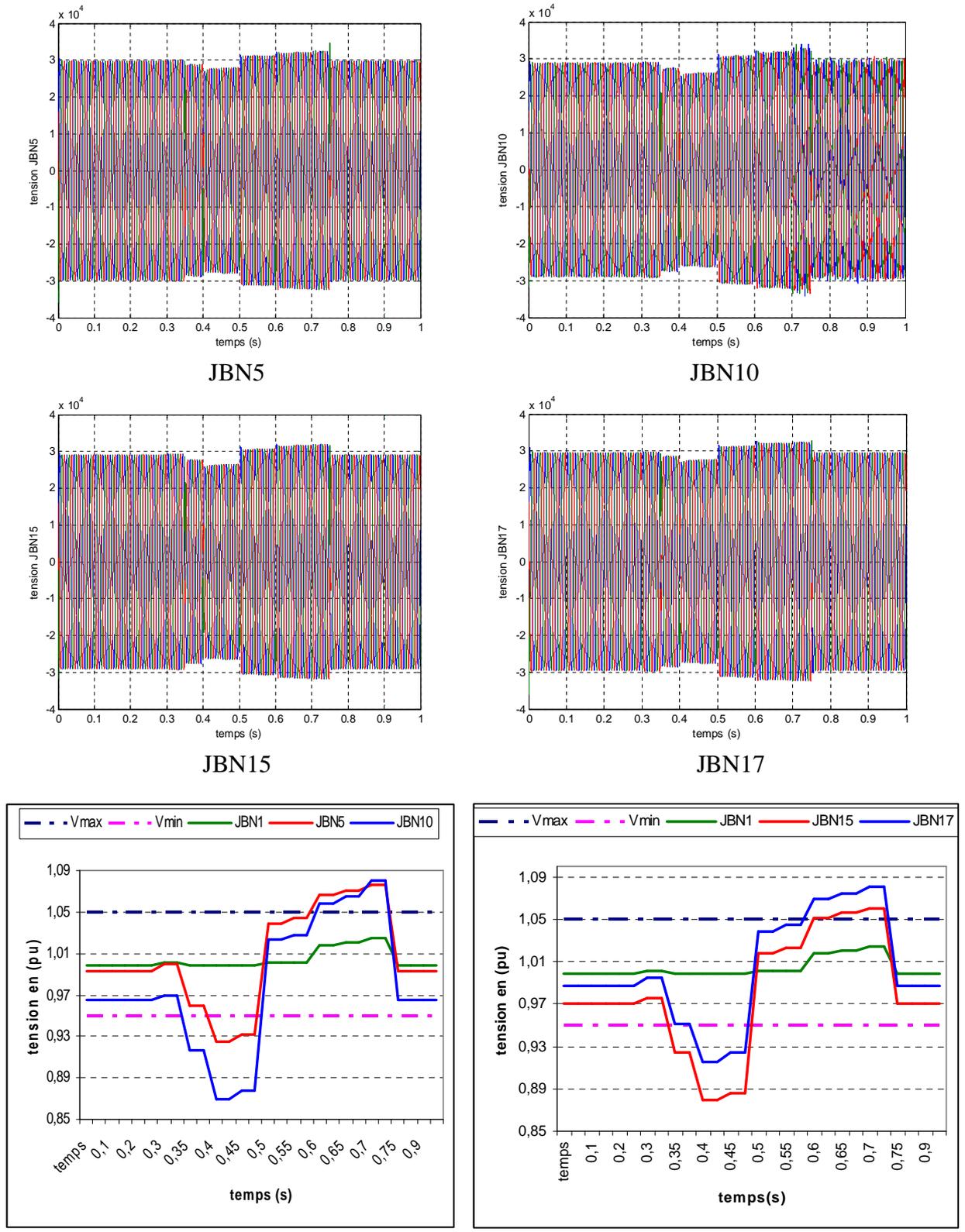


Figure (IV-31): Transit de tension dans JBN5 et JBN10, JBN15 et JBN17 pour le scénario défini.

Ces événements nous amènent lors du déroulement du scénario d'un cas ou une forte charge ainsi qu'une faible production sont présentés sur le réseau, à un cas avec une forte production ainsi qu'une faible charge.

On voit bien que la tension a dépassé les limites admissibles pour les différents jeux de barres sauf le JBN1 qui est resté dans ces limites.

### II.4.2.b.1. Test pour des PDE contrôlées en tangente phi : [2]

Dans un premier temps les PDE sont contrôlées en tangente phi (P/Q), le modèle de contrôle en puissances est donc utilisé. Aucun contrôle sur la tension n'est réalisé, ainsi la consigne production de puissance réactive de chaque PDE est nulle. Seule la production de puissance active est considérée, en laissant la tension fluctuer librement.

Pour plus de lisibilité, les courbes seront illustrées et groupées en fonction des contraintes visibles en tensions. La Figure (IV-30.a) illustre les évolutions superposées des tensions des PDE 5 et 10 situées en bout de ligne, et la Figure (IV-30.b) l'évolution des PDE 15 et 17. De plus sur ces deux courbes est ajoutée la tension au noeud N1 de manière à voir l'évolution de la tension à l'origine de chaque départ.

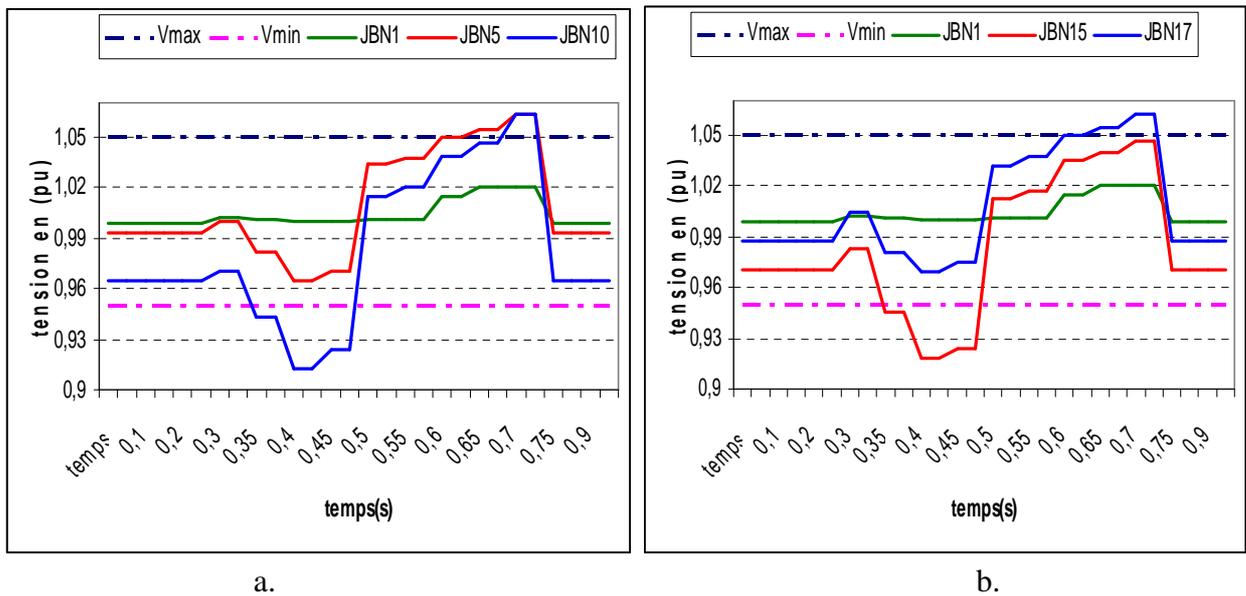


Figure (IV-32).a : Evolution de la tension des PDE N5 et N10, b : Evolution de la tension des PDE N15 et N17

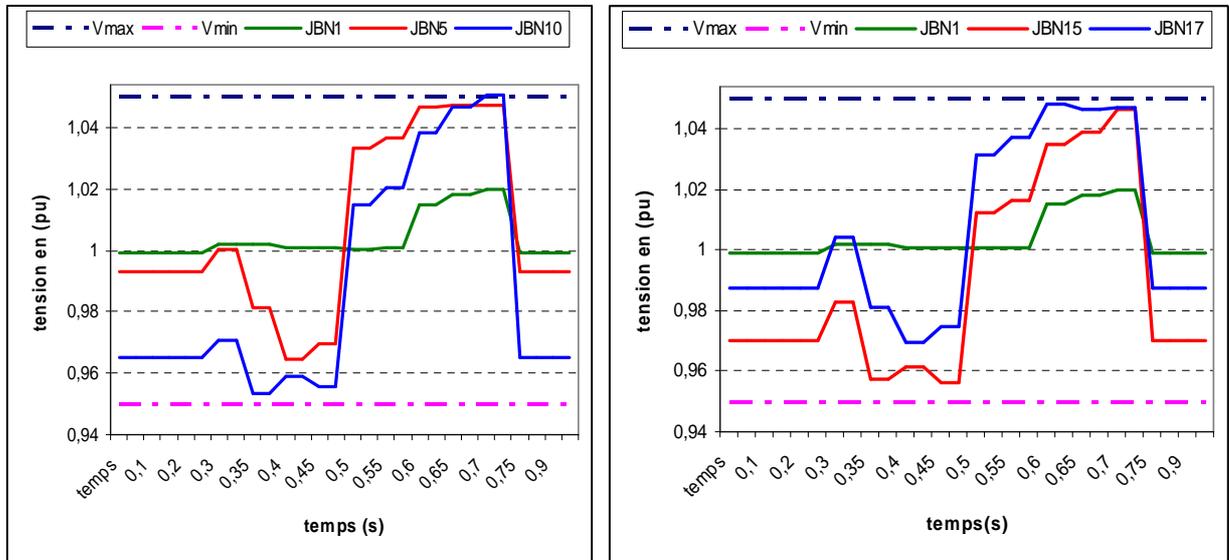
Dans ce scénario, deux cas critiques d'exploitation sont illustrés, le premier avec un faible taux d'insertion (forte charge et une faible production), le second avec un fort taux d'insertion (faible charge mais une forte production). Ceci nous amène à constater des sous tensions aux temps  $t=0.35$  à  $t=0.50$ s pour les PDE N10 et N15, ainsi que des surtensions aux temps  $t=0.65$  à  $t=0.75$ s pour les PDE N15, N17 et des surtensions aux temps  $t=0.70$  à  $t=0.75$ s pour la PDE N10.

Ce scénario met donc en évidence le dépassement des limites de tension dû à la production de puissance active sur un réseau de distribution. Ainsi il va être possible d'intervenir grâce aux groupes de productions, sur la tension en absorbant ou fournissant de la puissance réactive selon les contraintes mesurées au point de connexion de chaque PDE. Le contrôle adaptatif créé va donc être testé sur ce même cas.

### II.4.2.b.2. Test pour des PDE contrôlées avec le régulateur adaptatif : [2]

Le scénario précédent est réutilisé pour tester le contrôle adaptatif, les consignes de tensions sont fixées aux limites admissibles maximale de 1.05 pu et minimale 0.95 pu des réseaux MT. Ainsi, si la tension dépasse ces valeurs, la production de puissance réactive des PDE va être modifiée pour maintenir la tension dans la fenêtre définie.

Les deux courbes représentent les évolutions des tensions des PDE précédemment identifiées comme étant sous contraintes,



a. b.  
 Figure (IV-33) : Evolution de la tension des PDE N5 et N10, b : Evolution de la tension des PDE N15 et N17

Les résultats obtenus montrent que ce type de régulation est efficace pour les PDE N5, N15 et N17. En effet, les tensions critiques des simulations précédentes sont évitées par une action sur leur production de puissance réactive. Cependant ceci n'est pas suffisant pour le cas de la PDE N10. La Figure (IV-33).b montre que ce groupe, en bout de ligne, ne peut pas contrôler efficacement la tension en son noeud de connexion. Celui-ci n'a pas une capacité de production de puissance réactive assez grande. Cette PDE étant en limitation, elle ne peut plus agir sur la tension. Il est donc nécessaire de profiter de l'aide des autres PDE, en effet, si les productions en aval des groupes en bout de ligne participaient au contrôle, l'effort à fournir par ceux-ci serait moins important. C'est dans cette optique que va être ajoutée une fenêtre de tensions limites plus étroites que la fenêtre d'admissibilité.

**II.4.2.c. Mise en place des modes de régulation du correcteur adaptatif :**

**II.4.2.c.1. Principe de fonctionnement : [2]**

Les simulations précédentes ont mis en avant le manque de coordination des PDE. En effet, les unités en bout de ligne voient une contrainte en tension beaucoup plus importante que ceux proches du poste de transformation. Ainsi, le poste source fixant une tension proche de la tension nominale, les productions voisines ne détectent pas de contrainte et ne participent pas au contrôle de tension. Il est nécessaire de répartir l'action de réglage pour une meilleure efficacité.

C'est dans cet objectif que le régulateur adaptatif va évoluer. Le principe est simple, pour faire participer toutes les PDE aux réglages, une fenêtre de tension « désirée » va être ajoutée au principe de contrôle. Au delà de cette fenêtre de tension, plus étroite que la fenêtre de tension admissible précédente, la production passe en régulation de tension. Il va donc être possible de faire réagir les PDE avant d'atteindre les tensions critiques.

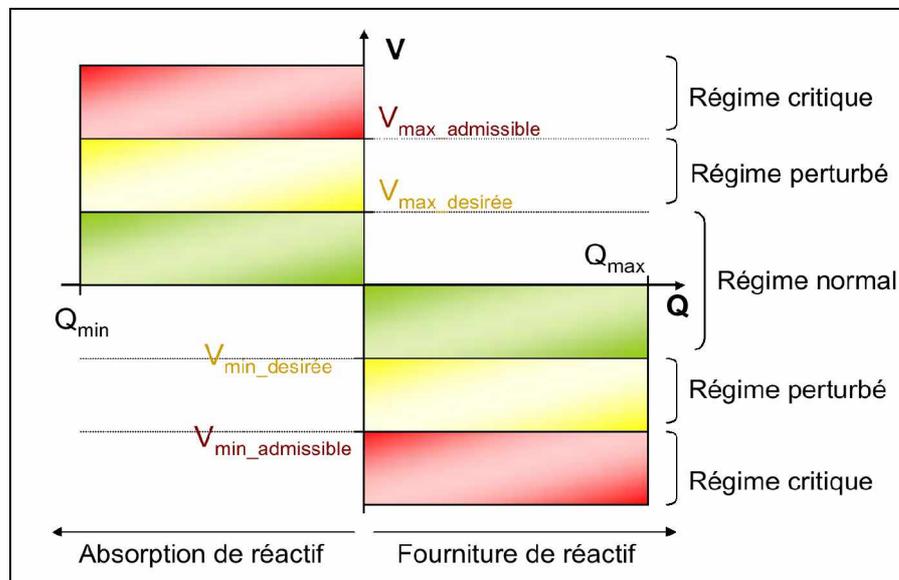


Figure (IV-34): Régimes de fonctionnements du régulateur adaptatif

Trois modes de fonctionnement du régulateur sont définis Figure (IV-34). Ceux-ci correspondent à trois régimes de fonctionnement possibles :

- ∅ Le régime normal: dans ce mode de fonctionnement, la tension est située dans une fenêtre de tensions "désirées" définie ( $V_{\min \text{ désirée}} \leq V \leq V_{\max \text{ désirée}}$ ). Dans le régime normal, les PDE sont contrôlées en puissances active et réactive.
- ∅ Le régime perturbé: dans ce mode de fonctionnement, la tension sort des limites désirées ( $V > V_{\max \text{ désirée}}$  ou  $V < V_{\min \text{ désirée}}$ ). Le but du régulateur adaptatif est de maintenir, dans les limites du système, la tension entre ces bornes fixées. Ainsi en régime perturbé, les PDE passent en mode de régulation de tension. Ici, seule la puissance réactive est utilisée pour contrôler la tension au point de connexion de la PDE, qui absorbe ou fournit de la puissance réactive pour respectivement diminuer ou augmenter la tension. Ainsi, l'unité de production va contrôler la tension aux limites désirées minimales ou maximales selon que la tension est trop basse ou trop élevée. Il peut y avoir des cas où la PDE entre en limitation, c'est-à-dire qu'elle ne peut plus ni fournir ni absorber plus de puissance réactive. Dans ce cas, la PDE ne peut plus assurer le contrôle de tension aux limites désirées, la tension peut évoluer jusqu'à atteindre les limites admissibles en tension, amenant la PDE à passer en régime critique.
- ∅ Le régime critique: dans ce mode de fonctionnement, la tension sort des limites d'admissibilité ( $V > V_{\max \text{ admissible}}$  ou  $V < V_{\min \text{ admissible}}$ ) et, comme explique précédemment, la PDE ne peut plus agir par compensation de puissance réactive ( $Q = Q_{\min}$  ou  $Q = Q_{\max}$ ). Dans ce cas critique pour le réseau, la PDE est en limitation et l'action par le biais de la puissance réactive n'est plus possible. Une action sur la puissance active devient nécessaire. Ainsi en régime critique une partie de la puissance active produite va être utilisée, en tant que dernier recours, pour contrôler la tension. Les PDE passent en mode de régulation de puissance active. La PDE diminue (ou augmente) sa production de puissance active afin de ramener la tension à la valeur  $V_{\max \text{ admissible}}$  (ou  $V_{\min \text{ admissible}}$ ). Dans ce cas, les valeurs limites de puissance réactive changent du fait que la puissance active

$$\text{change. } Q = \sqrt{S^2 - P^2} \dots\dots\dots \text{IV-14}$$

L'action de réduction de production est équivalente à une action de reprise de charge pour diminuer la tension.

Grâce aux régulations de puissance active et réactive, une solution de sauvegarde de la tension est toujours trouvée dans n'importe quel régime de fonctionnement. Cependant l'action sur la puissance active reste une action de secours puisque celle-ci est vendue par le producteur qui n'a donc aucun intérêt à faire du réglage de tension par ce biais, ou alors grâce à une compensation financière appropriée.

Les illustrations de fonctionnement de ce régulateur seront faites pour des consignes fixées et identiques pour chaque PDE.

#### II.4.2.c.2. Test des modes de régulations intégrés au contrôle adaptatif des PDE :

Ce contrôle est testé toujours sur le même scénario et les consignes désirées sont définies de manière identique pour toutes les unités de production. Ainsi,  $V_{\max\_desiree}=1,04pu$  et  $V_{\min\_desiree}=0,94pu$  ; ces valeurs plus petites que les valeurs de tensions admissibles vont permettre aux PDE de participer à la régulation avant d'atteindre les valeurs critiques, et donc de forcer la participation de unités n'agissant pas sur leurs puissances réactives précédemment.

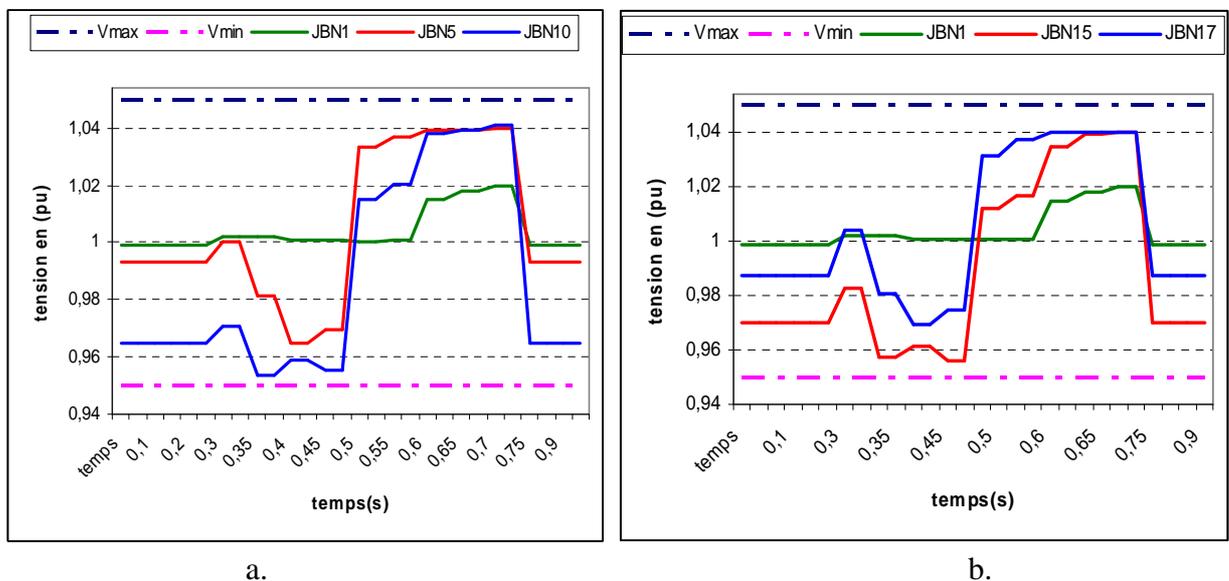


Figure (IV-35) : Evolution de la tension des PDE N5 et N10, b : Evolution de la tension des PDE N15 et N17

Les courbes de tension Figure (IV-35).a et.b permettent de constater que cette solution est efficace, dans ces conditions, pour garder la tension en tous points du réseau à l'intérieur de la plage de tensions admissibles. En effet, cette solution offre une marge de manoeuvre réduite.

### **III. CONCLUSION :**

Ce chapitre a été dédié à la régulation de la tension dans les réseaux électriques de distribution.

Dans la première partie on a passé en revue les principaux moyens de réglage de la tension utilisés dans un réseau de distribution. Parmi ces moyens de réglage, on s'est intéressé plus particulièrement au réglage de la tension basé sur le contrôle de la puissance active et réactive fournie ou absorbée par les sources de production décentralisée.

Le premier intérêt de la régulation de tension par action sur la puissance active réside dans la possibilité de maintenir la production de puissance active au maximum possible dans le cas d'un réseau peu chargé.

En outre, ce principe de réglage peut permettre d'augmenter le taux de pénétration de la production décentralisée dans un réseau de distribution. Dans cette hypothèse, cette étude doit alors être complétée par une analyse statistique sur un long cycle de fonctionnement pour évaluer l'intérêt économique d'une solution basée sur la limitation temporaire de la production de puissance active.

# ***Conclusion Générale***

Dans ce mémoire intitulé: “Etude des variation rapides de tension pour le raccordement d’une production décentralisée dans un réseau MT”, 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 aboutis à la proposition des solutions pour le problème de tension sur les réseaux de distribution, lié à la connexion de productions sur celui-ci. Ainsi, ces études ont permis l’identification des PDE et de leurs impacts entrant dans la problématique du contrôle de tension sur les réseaux de distribution.

On a tout d’abord exposé les différentes parties du réseau électrique où l’on s’est intéressé au réseau électrique de distribution. On a discuté son rôle, architecture et schémas d’exploitation...etc.

Il a été vu que le réseau de distribution, de par sa structure et les réglages existants, n’est pas dimensionné pour l’accueil de PDE à grande échelle.

La présentation de ces productions décentralisées (PDE) a fait l’objet du 2<sup>ème</sup> chapitre, portant sur les différentes caractéristiques de Production Décentralisée ainsi que leurs types qui ont été proposées dans la littérature et arrivant à l’intégration de PDE sur les réseaux de distribution.

Dans le 3<sup>ème</sup> chapitre, on a procédé à l’impact de la production décentralisée sur le réseau de distribution. L’insertion d’un trop fort taux de pénétration induit des problèmes comme l’impact sur le sens de transit de puissance, l’impact sur la stabilité du système, l’impact sur le plan de protection et l’impact sur la tenue de tension ou des surtensions qui, en fonction des états de charge du réseau, peuvent entraîner un non respect des valeurs de tensions maximum admissibles. Ainsi, plutôt que d’ajouter des moyens de réglages supplémentaires, le contrôle de tension est réalisé par les PDE. Cependant le réseau de distribution étant à l’heure actuelle, dans sa majorité, non observable et la quantité de PDE connectées au réseau allant croissant, le régulateur réalisé est capable de garantir un contrôle global de la tension sans communication ni coordination extérieur.

Dans le dernier chapitre, un travail de modélisation et de réflexion sur le type de phénomène à mettre en évidence a été fait. Deux types de productions ont été pris en compte lors de ces travaux, à savoir les PDE interfacées au réseau via un onduleur et les productions intégrant un alternateur synchrone. Pour chaque modèle de PDE des contrôles en puissances et en tension ont été développés. Ensuite, un contrôle de tension intelligent, intégrant ces deux modes de régulation de puissances et de tension a été élaboré pour conserver la tension, au point de connexion de la production, dans une fenêtre de tensions limites de consignes.

La PDE bascule d'un contrôle en puissance à un contrôle en tension si le niveau de tension devient critique. Le fait d'envisager le contrôle de tension comme un problème local permet, d'après les scénarii étudiés, de limiter les transits de puissance réactive et, d'induire moins de pertes sur le réseau. Sous MATLAB SIMULINK, on a exposé les différents résultats qui apparaissent de l'utilisation des ces solutions.

La conclusion que l'on peut tirer est que le domaine de la production décentralisée est très large et complexe. Toutefois et à défaut de temps, plusieurs points n'ont pas été traités et ouvrent les portes vers beaucoup d'améliorations.



# Bibliographie

- [1] Olivier RICHARDOT « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée » Thèse de doctorat INPG, 2000.
- [2] Guillaume RAMI « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution » Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [3] Cong Duc PHAM « Détection et localisation de défauts dans les réseaux de distribution HTA en présence de génération d'énergie dispersée » Thèse de doctorat INPG, 2005.
- [4] TransEnergie1999 « caractéristiques et cibles de qualité de la tension fournie par le réseau de transport d'Hydro\_Québec ».
- [5] RTE, « Mémento de la sûreté du système électrique », 2004
- [6] B.Crappe, « Commande et régulation des réseaux électriques », Hermes sciences, 2003.
- [7] J.F.Canard, « Impact de la génération d'énergie dispersée dans le réseaux de distribution », Thèse de doctorat de l'INPG, Décembre 2000.
- [8] Commission AMPERE « évaluation de la production décentralisée effets sur le réseau ».
- [9] Abdenour ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » Thèse de doctorat DE L'INPT 2007
- [10] Haizea GAZTAÑAGA ARANTZAMENDI « étude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée: application aux microréseaux » Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [11] M. Nasser, « Etude d'un générateur éolien a vitesse variable basé sur une génératrice asynchrone à cage », Mémoire C.N.A.M, 29Mars, 2001.
- [12] Salma EL AIMÂNI « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » Thèse de doctorat E.C.L 2004.
- [13] Vincent ROGEZ « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire ». Thèse de doctorat de l'université d'ARTOIS 2004.
- [14] Info Energie « Le photovoltaïque (PV) raccordé au réseau public de distribution ». avril 2007
- [15] Yann PANKOW « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque ». Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2004.
- [16] UEM « Liste des études à mener pour le raccordement d'un utilisateur HTA aux réseaux publics de distribution » Référentiel technique HTA et BT 2005.
- [17] Synergrid « prescription techniques spécifiques de raccordement d'installations de production décentralisée fonctionnant en parallèle sur le réseau de distribution » 06.2006

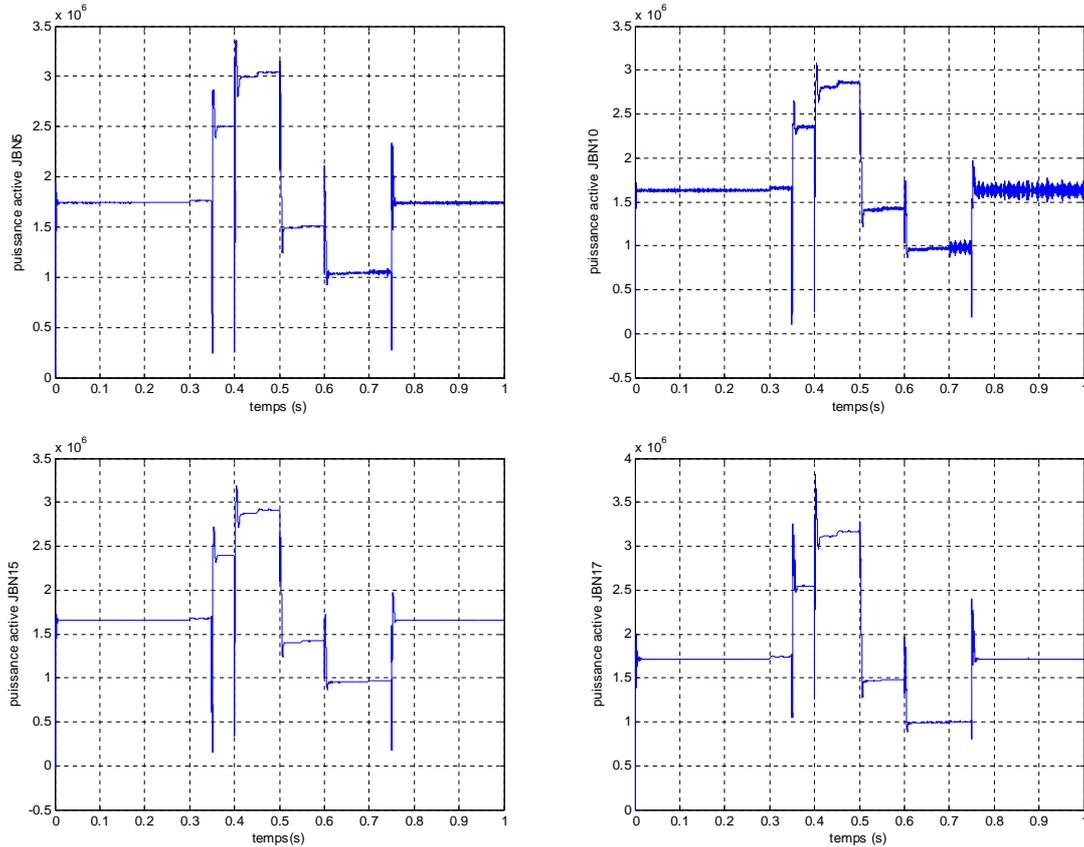
- [18] Ismaël Daoud, Nicolas Pierreux « Analyse des systèmes de micro-cogénération » Ingénieur Civil Electromécanicien 2000-2001.
- [19] Thi Thu Hà PHAM « influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissances ». Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [20] SICAE\_oise « Raccordement d'une production décentralisée A-coups et variations rapides de tension » .Référentiel technique 2006.
- [21] EDF « Étude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée en HTA » NOP-RES\_22E 2005.
- [22] Abdelaziz ARBAOUI « aide a la décision pour la définition d'un système éolien adéquation au site et à un réseau faible ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2006.
- [23] Haritza CAMBLONG « minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolien dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2003.
- [24] Emanuel Florin MOGOS « production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources ». Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2005.
- [25] Union Technique de l'Electricité et de la Communication, NF EN 50 160: « Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution ». Norme NF EN 50160 - mai 2000, éditée par l'Union Technique de l'Electricité et de la Communication, BP 23, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex.
- [26] G. Strbac, N. Jenkins, M. Hird, and ail. « Integration of operation of emhedded generation and distribution networks ». Final Report K/EL/00262/REP URN 02/1145, Mai, 2002, consultable sur le site: <http://www.distributedgeneration.gov.uk>.
- [27] R. H. Lasseter, « Control of distributed resources », Symp. Proc., Bulk-Power Power Systems Dynamics and Control IV Restructuring, 323-329, Santorini (Grecia), 24-28 Aug 1998.
- [28] S.W.H.de Haan, « Power electronics for renewable energy systems: state of te art, trends and challenges », PEMC'96, vol. 3, p. 31-38, 1996.
- [29] georges gerges\*, ali el-ali\*, nazih moubayed\*, rachid outbib « l'énergie eolienne au liban : bilan annuel,rendement et rentabilite » 6th international conference on electromechanical and power systems, October 4-6, 2007 - chi\_in\_u, rep.moldova.

# **ANNEXE**

# ANNEXE I

## § Détails de simulation du chapitre \_4 :

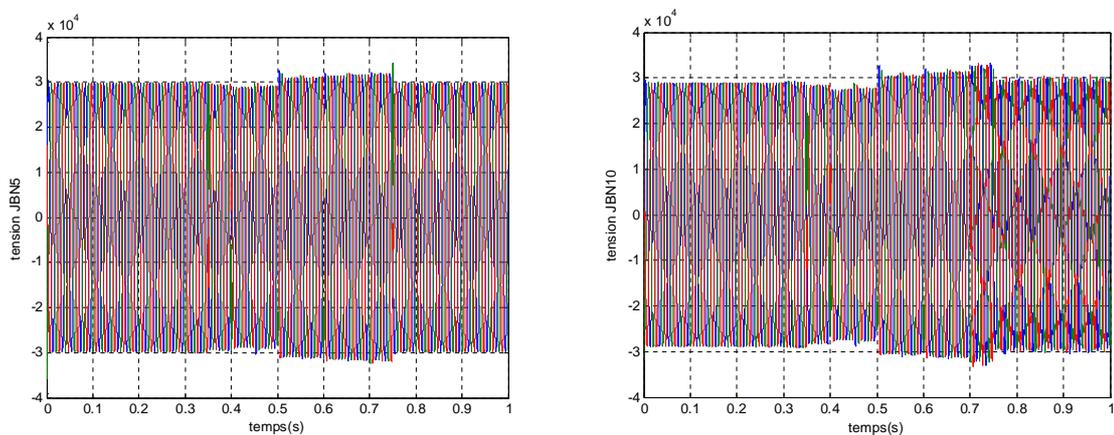
### 1\_ puissances actives dans les différents JB pour le scénario défini.

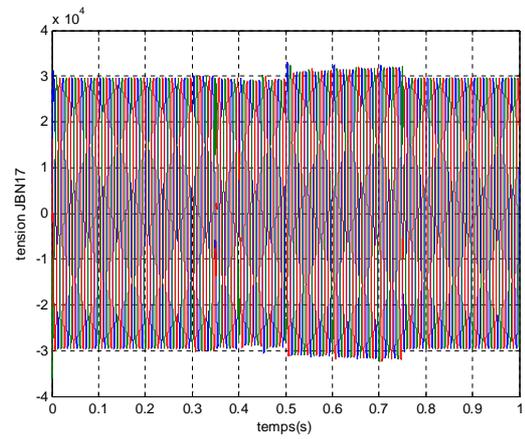
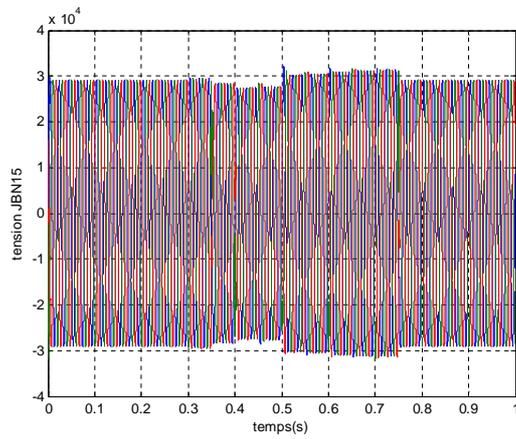


Vmax (pu)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Vmin (pu)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
JBN1 (pu)	0.999	1.001	0.999	0.9987	0.9989	1.001	1.0015	1.018	1.025	1.025	0.999
JBN5 (pu)	0.9933	0.9999	0.959	0.9248	0.9314	1.0384	1.0439	1.0658	1.0708	1.0762	0.9933
JBN10(pu)	0.965	0.970	0.916	0.870	0.878	1.023	1.028	1.058	1.065	1.080	0.965
JBN15(pu)	0.9699	0.9761	0.9240	0.8797	0.8860	1.0183	1.0233	1.0513	1.0559	1.0606	0.9699
JBN17(pu)	0.9875	0.9951	0.9518	0.9156	0.9239	1.0389	1.0449	1.0697	1.0749	1.0810	0.9875
Temps (s)	0-0.3	0.30- 0.35	0.35- 0.40	0.40- 0.45	0.45- 0.50	0.50- 0.55	0.55- 0.60	0.60- 0.65	0.65- 0.70	0.70- 0.75	0.75- 1.00

Evolution de la tension des JBN 5, 10, 15 et 17.

### 2\_ Test pour des PDE contrôlées en tangente phi :

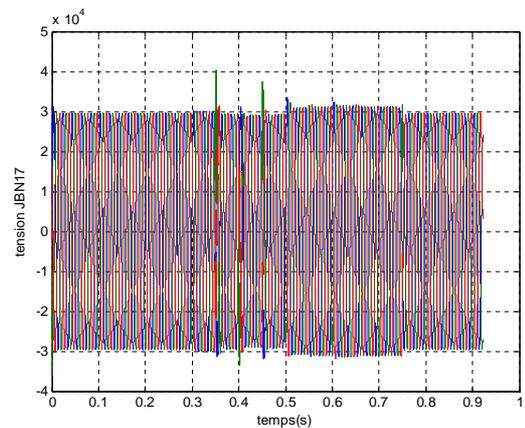
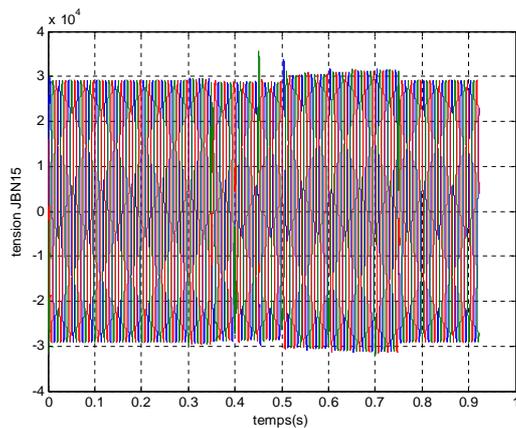
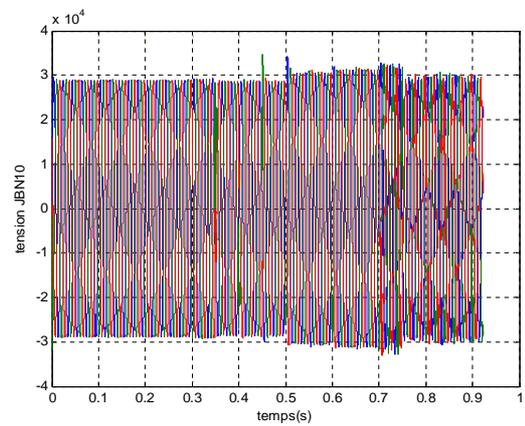
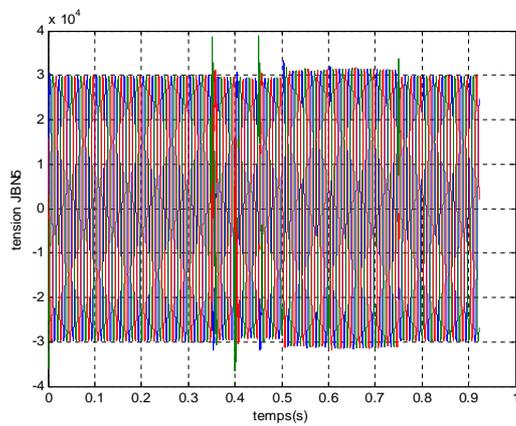




Vmax (pu)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Vmin (pu)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
JBN1 (pu)	0.999	1.002	1.001	0.9999	1.0000	1.0005	1.0010	1.015	1.020	1.0202	0.999
JBN5 (pu)	0.9933	1.0001	0.9816	0.9648	0.9698	1.0333	1.0369	1.0499	1.0546	1.0633	0.9933
JBN10(pu)	0.965	0.9706	0.9433	0.9126	0.9233	1.0150	1.0206	1.0383	1.0466	1.0633	0.965
JBN15(pu)	0.9699	0.9830	0.9453	0.9183	0.9233	1.0123	1.0166	1.0350	1.0391	1.0463	0.9699
JBN17(pu)	0.9875	1.0040	0.9810	0.9693	0.9746	1.0316	1.0373	1.0495	1.0543	1.0616	0.9875
Temps (s)	0-0.3	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	1.00

Evolution de la tension des JBN 5, 10, 15 et 17.

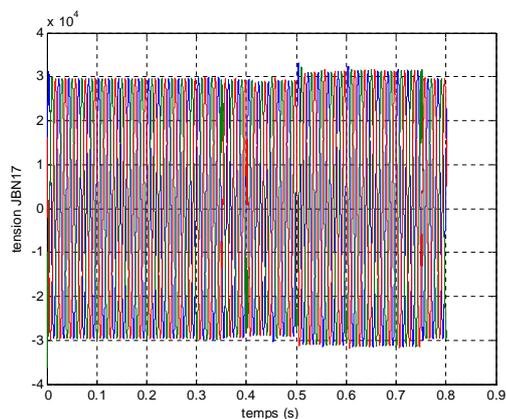
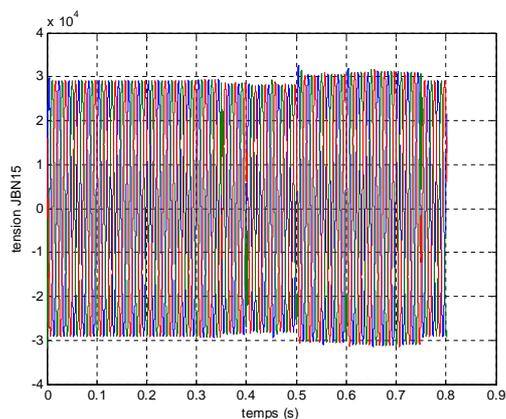
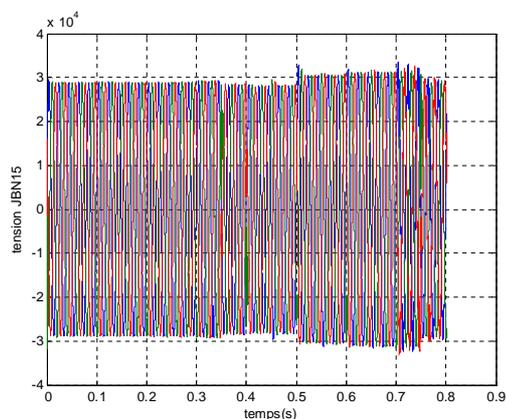
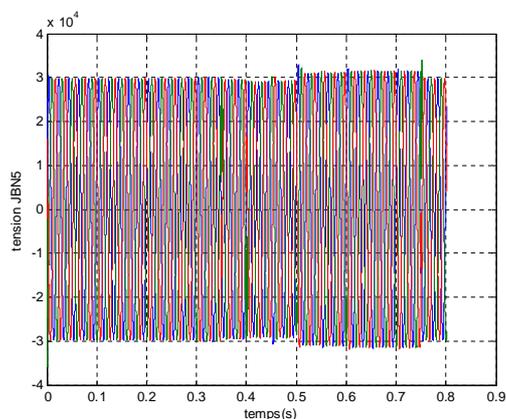
### 3\_Test pour des PDE contrôlées avec le régulateur adaptatif :



Vmax (pu)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Vmin (pu)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
JBN1 (pu)	0.999	1.002	1.002	1.001	1.001	1.0005	1.0010	1.015	1.018	1.0199	0.999
JBN5 (pu)	0.9933	1.0001	0.9816	0.9648	0.9698	1.0333	1.0369	1.0470	1.0472	1.0473	0.9933
JBN10(pu)	0.965	0.9733	0.9536	0.9591	0.9554	1.0146	1.0218	1.0386	1.0406	1.0509	0.965
JBN15(pu)	0.9699	0.9832	0.9574	0.9612	0.9561	1.0125	1.0168	1.0351	1.0389	1.0453	0.9699
JBN17(pu)	0.9875	1.0042	0.9812	0.9702	0.9750	1.0317	1.0370	1.0480	1.0467	1.0469	0.9875

Evolution de la tension des JBN 5, 10, 15 et 17.

#### 4\_Test des modes de régulations intégrés au contrôle adaptatif des PDE :



Vmax (pu)	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05	1.05
Vmin (pu)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
JBN1 (pu)	0.999	1.002	1.002	1.001	1.001	1.0005	1.0010	1.015	1.018	1.0199	0.999
JBN5 (pu)	0.9933	1.0001	0.9816	0.9648	0.9698	1.0333	1.0369	1.0390	1.0393	1.0399	0.9933
JBN10(pu)	0.965	0.9733	0.9536	0.9591	0.9554	1.0146	1.0218	1.0386	1.0390	1.0409	0.965
JBN15(pu)	0.9699	0.9832	0.9574	0.9612	0.9561	1.0125	1.0168	1.0351	1.0389	1.0399	0.9699
JBN17(pu)	0.9875	1.0042	0.9812	0.9702	0.9750	1.0317	1.0370	1.04001	1.0399	1.03999	0.9875
Temps (s)	0-0.3	0.30- 0.35	0.35- 0.40	0.40- 0.45	0.45- 0.50	0.50- 0.55	0.55- 0.60	0.60- 0.65	0.65- 0.70	0.70- 0.75	0.75- 1.00

Evolution de la tension des JBN 5, 10, 15 et 17.

### *Summary*

The work that we in this memory of magister consists to define the new types of electric energy production called decentralized production (PDE) then the adjusting of this production to the level of distribution networks and the impacts led by this insertion or one is interested in the assessment is the state of the stability of the tension in the electric networks.

The most important part of our work consists to try to modeling this production and determined the efficient solutions to be able to control this production in order to remain in the admissible limits of tension. We have by continuation done simulations by MATLAB; according to the gotten results we can conclude that the regulations are validness.

**Key words:** Electric network, Decentralized production, Modeling, Adaptive.

### **ملخص**

العمل المنجز في مذكرة الماجستير يتضمن التعريف بالمصادر الجديدة لإنتاج الطاقة والمسماة بالطاقة اللامركزية ثم إدماج هذه الطاقة على مستوى شبكات التوزيع و ما ينتج عنه من مشاكل وخاصة على مستوى التوتر في الشبكات الكهربائية. الجزء الأكثر أهمية في هذا العمل يتضمن في محاولة نمذجة هذه المصادر والبحث عن حلول فعالة للتحكم فيها وإبقاء التوتر في الحدود المسموح بها وبعد النتائج المتحصل عليها يمكن القول بان الحلول فعالة.

**كلمات الحل:** الشبكات الكهربائية , الإنتاج اللامركزي, نمذجة, تكيفي.

### ***Résumé***

Le travail réalisé proposons dans ce mémoire de magister consiste à définir les nouveaux types de production d'énergie électrique appelé production décentralisée (PDE) ensuite le raccordement de ces production au niveau des réseaux de distribution et les impactes induits par cette insertion ou on s'intéresse à l'évaluation de l'état de la stabilité de la tension des réseaux électriques.

La partie la plus importante de notre travail consiste à essayé de modélisé ces production et de déterminée des solutions efficaces pour pouvoir contrôler ces production afin de resté dan les limites admissibles de la tension. Nous avons par suite effectué des simulations par MATLAB, d'après les résultats obtenus on peut conclure que les régulations sont valides.

***Mots-clé*** : Réseau électrique, Production Décentralisée, Modélisation, Adaptatif.