

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf: 978...../2018



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière:** Electrotechnique

**Spécialité:** Réseaux électriques

**Par:** (BELHAOUES Mounir)

### Thème

**Analyse de la tension et du flux de puissance dans un réseau électrique de distribution en présence d'une production décentralisée**

Soutenu publiquement, le 25/06/2018, devant le jury composé de:

M. BOULOUH Messaoud  
M. LADJIMI Abdelaziz  
M. MENDACI Sofiane  
M. BOUZIT Ali

MCA  
MCA  
MCA  
MAA

Univ. Guelma Président  
Univ. Guelma Encadreur  
Univ. Guelma Examineur  
Univ. Guelma Examineur

**Année Universitaire: 2017/2018**

18/3797

## **Remerciement**

## *Remerciements*

*En premier nous remercions lieu Dieu qui nos avoir donné la force, la patience, la volonté et le courage pour terminer ce travail modeste.*

*Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadreur Dr. Abdelaziz Ladjimi qui a proposé et a dirigé ce travail.*

*Nous tenons à remercier monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.*

*Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel du département de Génie Electrotechnique et Automatique de Guelma pour les facilités qu'ils m'ont accordés pour terminer ce travail.*

*Enfin, Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.*

## Dédicace

*Au terme de ce très modeste travail, je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes qui m'ont soutenue durant la réalisation de ce mémoire.*

*Mes très chers parents :*

*Ce travail est dédié à mon père Abdel Aziz Belhaoues, décédé trop tôt.*

*J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !*

*Ma très chère mère, vous avez toute ma gratitude, car c'est grâce à toi que j'ai atteint mon but.... je vous remercie pour votre soutien moral, vos encouragements et vos conseils qui mon guidés durant mon parcours.*

*A mes très chères sœurs pour leur affection, compréhension et patience.*

*Tous mes amies intimes, et à toute personne qui me connait.*

*A tous les enseignants de ma formation à partir du primaire au master et particulièrement mes profs de génie procédés au lycée.*

*A tous mes collègues de l'Etude et particulièrement la promotion de BAC 2013 et la promotion de master Réseaux électriques 2017/2018.*

# **Sommaire**

# Sommaire

---

II.5.1. Type de raccordement.....	26
II.5.2. La capacité d'accueil des réseaux de distribution .....	26
II.6. Conclusion .....	27

## CHAPITRE III – EFFET DE L'INTÉGRATION DE LA PRODUCTION DÉCENTRALISÉE SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE DE DISTRIBUTION

III.1. Introduction .....	29
III.2. impact de la production décentralisée sur le réseau de distribution .....	30
III.2.1. Modification des transits de Puissance.....	30
III.2.2. Modification du plan de tension .....	30
III.2.3. Impacts sur la qualité du système .....	31
III.2.3.1. Les creux et l'élévation de la tension .....	31
III.2.3.2. Flicker.....	32
III.2.3.3. Les harmoniques.....	32
III.2.4. Impacts sur la qualité de service.....	32
III.2.5. Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système.....	33
III.2.6. Impacts sur la stabilité du système .....	33
III.2.7. Impacts sur la continuité de service.....	33
III.2.8. Courant de court-circuit.....	33
III.2.9. Influence sur la sélectivité des protections .....	34
III.2.11. impact sur La tenue de fréquence .....	35
III.2.12. Impacts sur le plan de protection.....	35
III.3. Analyse de l'impact d'intégration de la production décentralisée au réseau de distribution.....	37
III.3.1. Réseau test.....	37
III.3.1.1. Méthode de calcul de l'écoulement de puissance.....	37
III.3.1.2. Calcul de l'écoulement de puissance.....	39
III.3.2. Interprétations.....	42
III.4. Conclusion.....	42
Conclusion générale .....	43
Bibliographie.....	44

## **Table de figure**

Listes de figures

CHAPITRE I – LA PRODUCTION DÉCENTRALISÉE

**Figure I.1:** Principe de fonctionnement de la cogénération ..... 6  
**Figure I.2:** schéma de différentes énergies renouvelables..... 7  
**Figure I.3:** Système solaire..... 8  
**Figure I.4:** 1-Cellule PV 2- Panneau 3-Champ PV ..... 9  
**Figure I.5:** le silicium ..... 9  
**Figure I.6:** Principe de fonctionnement des cellules solaires ..... 10  
**Figure I.7:** énergie éolienne ..... 11  
**Figure I.8:** Les compositions d'une éolienne ..... 12  
**Figure I.9:** Energie géothermique ..... 15  
**Figure I.10:** pompe à chaleur ..... 15

CHAPITRE II – LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE DE DISTRIBUTION

**Figure II.1:** Architecture générale de réseaux d'énergies électrique en Algérie..... 20  
**Figure II.2:** Architecture générale du réseau de distribution HTA ..... 22  
**Figure II.3:** Schéma de principe des postes sources HTB/HTA ..... 24  
**Figure II.4:** Simple dérivation ..... 25  
**Figure II.5:** Double dérivation..... 25  
**Figure II.6:** Coupure d'artère ..... 25  
**Figure II.7:** Illustration des configurations de raccordement (a) en départ mixte (b) en départ direct 26  
**Figure II.8:** Modèle d'un départ HTA..... 27

CHAPITRE III – EFFET DE L'INTÉGRATION DE LA PRODUCTION DÉCENTRALISÉE  
SUR LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE DE DISTRIBUTION

**Figure III.1:** Flux d'énergie sur un réseau de distribution en présence de GED ..... 30  
**Figure III.2:** Illustration de la chute de tension..... 31  
**Figure III.3:** Influence de la production décentralisée sur la sélectivité de la protection des réseaux de distribution..... 34  
**Figure III.4:** Problème d'aveuglement de protections ..... 36  
**Figure III.5:** Problème du déclenchement intempestif de protections ..... 36  
**Figure III.6:** Schéma du réseau étudié ..... 37  
**Figure III.7:** réseau de distribution radiale ..... 37  
**Figure III.8:** Algorithme de Calcul de l'écoulement de puissance ..... 38



<b>Figure III.9:</b> Allure de la tension au niveau des 5 jeux de barre.....	39
<b>Figure III.10:</b> Transit de puissance dans le réseau test sans PD .....	39
<b>Figure III.11:</b> Exemple d'effet bénéfique de l'insertion de GED dans le réseau test .....	40
<b>Figure III.12:</b> Exemple de surtension provoqué par l'insertion de PD .....	40
<b>Figure III.13:</b> Transit de puissance dans le réseau test avec une PD connectée au nœud 5 .....	40
<b>Figure III.14:</b> Plan de tension provoqué par l'insertion de PD au nœud 5.....	41
<b>Figure III.15:</b> Exemple d'une exportation de puissance vers le réseau de transport.....	41
<b>Figure III.16:</b> Plan de tension provoqué par l'injection de deux PD au réseau test.....	41

### Liste des tableaux

<b>Tableau (II.1):</b> Tableau des domaines de tension .....	21
--	----

## **Liste de symboles**

## Symboles

**PDE** : Production Décentralisée d'Énergie.

**GED** : Génération d'Énergie Distribuée.

**JDB** : Jeu De Barre.

**HTA** : Haute Tension.

**HTB/ MT** : Moyenne Tension.

**BT** : Basse Tension.

**TBT** : Très Basse tension.

**NO** : Normalement Ouvert.

**NF** : Normalement Fermé.

**CS** : Câble de Secours.

**CT** : Câble de Travail.

**TG** : Turbines à Gaz.

**PV** : photovoltaïque.

**R** : Résistance de la ligne.

**X** : Réactance de la ligne.

**Z** : Impédance de la ligne.

**P** : Puissances active.

**Q** : Puissances active.

**DV** : Chute de tension de la ligne.

**$S_i(j)$**  : Puissance injectée en amont.

**$S_i(j + 1)$**  : Puissance injectée en aval.

**$S_d(j)$**  : Puissance demandée.

**$S_l(j + 1)$**  : Puissance perdue sur le long de la branche.

**$I_i(j + 1)$**  : Le courant injecté au (j+1) ième nœud.

**$I_{af 1}$**  : courant de défaut provenant du réseau amont.

# **Introduction générale**

### *Introduction Générale*

La transition énergétique à travers le monde nous dirige vers une nouvelle période de la libération du marché électrique. La tendance vers la dérégulation devient de plus en plus répandue. Cette dérégulation permet la privatisation progressive dans la génération et la distribution de l'énergie. Elle conduit enfin à une décentralisation dans les modes d'exploitation du système électrique et une diversité dans les moyens de génération et de distribution de l'énergie.

D'autre part, ces dernières années, un ensemble de raisons tel que : l'obligation de réduire l'émission de gaz à effet de serre, la menace de l'épuisement de l'énergie fossile, le problème de l'indépendance énergétique, et le développement durable, nous poussent à considérer le problème énergétique non seulement selon le point de vue économique, mais également selon un point de vue écologique.

Ceci a encouragé un grand nombre de pays à développer leur système d'énergie sur la base de la production décentralisée à grande échelle comprenant les énergies renouvelables et les solutions à haut rendement énergétique (cogénération). Ces deux dernières évolutions se traduisent par une insertion des productions décentralisées ou générations d'énergie dispersées (PD) dans le réseau électrique.

Les PD ont des apports potentiels très intéressants en termes d'énergie et d'économie. Cependant, en fonction de leur taux de pénétration, ces nouvelles sources d'énergie pourraient avoir des conséquences importantes sur l'exploitation et la sécurité des réseaux électriques. Pour une insertion massive des PD au système, ces impacts se trouveront non seulement au niveau du réseau de distribution, mais aussi le système entier en terme :

- D'incertitude dans la planification des moyens de production (liée à la prévision météorologique, l'intermittence des sources...);
- d'augmentation de la fragilité dans l'exploitation due :
- au changement de la marge de réserve d'exploitation
- à la sensibilité des PD à des perturbations dans le réseau ;
- et à la complexité de la coordination de la conduite du réseau.

L'objectif de ce mémoire est alors d'étudier l'effet de l'insertion des unités de production à la base de sources d'énergie renouvelables sur l'exploitation du réseau de distribution moyenne tension.

L'étude présentée dans ce mémoire s'organise comme suit :

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

Dans le deuxième chapitre nous exposons d'une manière brève sur les réseaux électriques et surtout la partie de distribution avec leurs différentes architecture et schémas d'exploitation.

Enfin, au troisième chapitre un calcul du flux de puissance dans un réseau de distribution radial avec l'injection d'une PD est effectué afin d'évaluer les paramètres tensions et puissances. On terminera ce travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## ***La production décentralisée***

## **I.1. Introduction**

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 [1].

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

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 [2].

On appelle ces nouveaux producteurs par plusieurs noms comme Production Décentralisée, Production Distribuée, Production Décentralisée d'Énergie (PDE), Génération d'Énergie Distribuée ou Génération d'Énergie Dispersée (GED) [3].

Dans ce premier 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.

## **I.2. Définition**

Le raccordement au réseau de nouveaux producteurs fait émerger de nouveaux concepts. Ainsi, pendant la dernière décennie, les termes de Production Décentralisée, Production Distribuée, Génération d'Énergie Distribuée, Génération Dispersée, Ressources d'Énergie Distribués ont envahi la littérature scientifique, politique et économique du système électrique

Il n'y a pas un seul critère pour définir la signification de chaque terme ; chaque association, groupe de travail ou auteur a sa propre définition. Ainsi, le terme Production Décentralisée ne fait pas référence à tous les producteurs raccordés au système électrique. Seuls quelques-uns remplissant certaines conditions font partie de la Production Décentralisée. Généralement, le paramètre utilisé est le point de raccordement au réseau [6].

La Production Décentralisée est définie, dans cette thèse, comme toute source d'énergie raccordée au réseau de distribution et qui fait partie des énergies renouvelables non



conventionnelles (éolienne, solaire, entre autres) ou conventionnelles de petite puissance (micro-turbines à gaz, cogénération, moyen de stockage de l'énergie entre autres), hors des grandes centrales [6].

### **I.3. Caractéristiques de Production Décentralisée**

La caractéristique fondamentale de la production décentralisée est d'être pilotée par un autre facteur que la demande d'électricité [5].

Il en résulte des incertitudes sûres :

- 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.

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 empiètements entre catégories [5].

#### **I.3.1. Systèmes à alternateurs classiques (machine synchrone)**

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 [5].

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

#### **I.3.2. Systèmes à générateurs asynchrones**

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

- Houle

### **I.3.3. Systèmes à interface avec convertisseur électronique**

- 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. Un panel des principales technologies mises en œuvre est proposé ci-dessous.

## **I.4. Différents types de production décentralisée**

Le réseau électrique se compose d'un ensemble d'ouvrages de production, de transport et de distribution de l'énergie électrique. Pour assurer sa stabilité, une bonne surveillance et un contrôle en temps réel de son fonctionnement est nécessaire.

La production d'électricité est tout simplement une conversion, une transformation d'énergie mécanique (liée au mouvement) en énergie électrique.

Dans les centrales, l'énergie mécanique est convertie en énergie électrique mais à plus grande échelle. On peut convertir également de l'énergie thermique, hydraulique ou encore éolienne en énergie électrique.

Les productions décentralisées se développent dans tous les pays, sur la base d'unités de production traditionnelle, de système à énergie renouvelable ou de cogénération installée par des producteurs indépendants. Les différentes technologies appartenant à trois groupes ci-dessus seront brièvement présentées ci-dessous :

### **I.4.1. 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 [7].

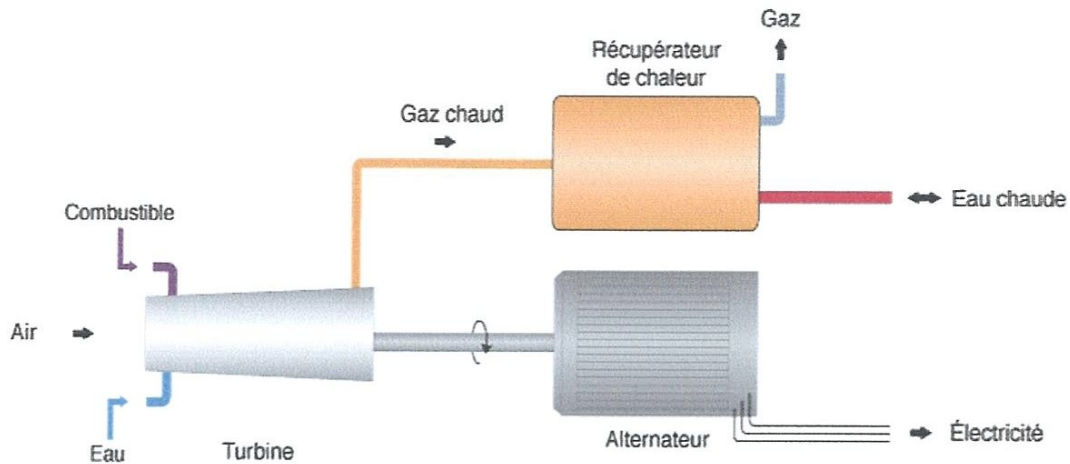


Figure I.1: Principe de fonctionnement de la cogénération

#### I.4.2. Les énergies non renouvelables (traditionnelle)

Energies fossiles (gaz, charbon, pétrole) : sont utilisées comme l'énergie primaire pour produire l'électricité. Les technologies utilisant ces énergies primaires sont nombreuses et bien éprouvées, ce qui leur confère un grand intérêt économique [8].

Les principales technologies sont :

- La thermique à flamme : basé sur des turbines à combustion (puissance disponible sur le marché de 25kW à 200 MW), ou micro-turbines à combustion (de 30 à 250kW).
- Les moteurs à combustibles fossiles : les moteurs à gaz (de 5kW à 5MW), les moteurs diesels (de 100kW à 25 MW), les moteurs Stirling (de 5 à 50 kW). 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 mégawatts [8].
- Hydrogène : Les piles à combustible (de 1KW a 1MW selon le type de pile 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 mégawatt, leurs technologies sont encore dans l'étape de recherche et de développement [7].

### I.4.3. Les énergies renouvelables

Une énergie renouvelable est une source d'énergie se renouvelant assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Les grandes catégories de technologies de production d'électricité par : [9]

- Énergie Solaire (thermique et photovoltaïque)
- Énergie Éolienne (Vent)
- Énergie Hydraulique (Marémotrice ; Hydrolienne, Barrage)
- Énergie de la Biomasse
- Énergie Géothermique

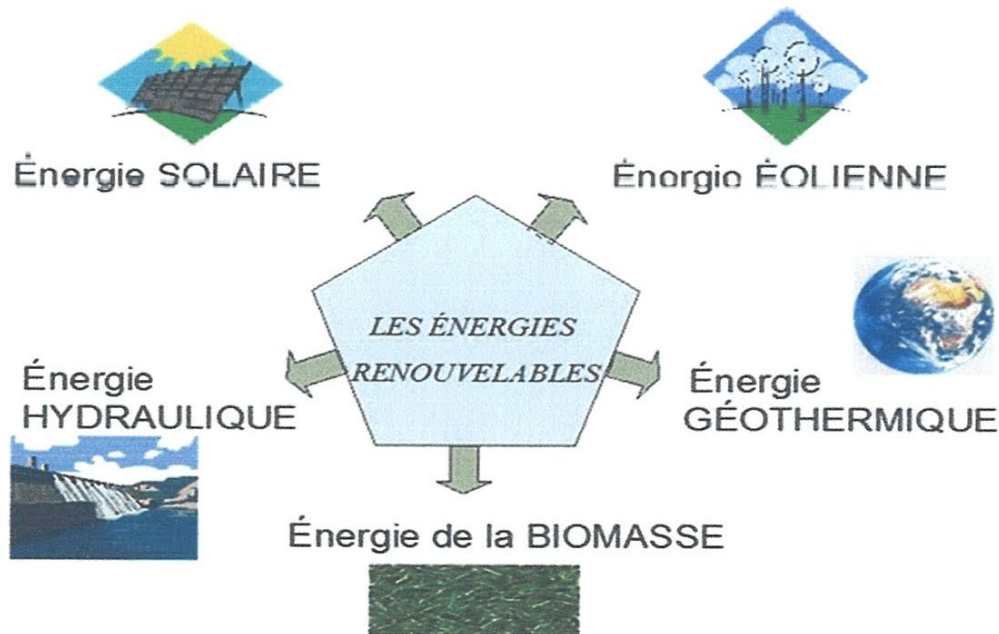


Figure I.2: schéma de différentes énergies renouvelables

### I.4.3.1. L'énergie solaire

Le soleil, bien que distant de plus de 150 millions de kilomètres de nous, demeure notre plus grande source d'énergie même si elle est intermittente avec l'alternance jour / nuit...

La source d'énergie renouvelable la plus abondante est sans aucun doute l'énergie solaire. Le Soleil envoie sur Terre une puissance de 90.000 térawatts (TW), à comparer aux 14 TW consommés par la population mondiale, et va continuer à le faire pendant quelques milliards d'années. Cependant, en raison de son caractère intermittent et de sa faible densité, il est capital de pouvoir stocker et concentrer cette énergie solaire sous forme de carburant [9].

#### A-L 'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est connue depuis les balbutiements de l'humanité. Elle traite simplement à la chaleur du rayonnement solaire, ou pour utiliser le langage des physiciens, à l'énergie calorifique transportée par le rayonnement solaire [9].

Précisons d'ailleurs que cette énergie, combinée à l'existence d'une atmosphère autour de notre bonne vieille terre, nous vaut, grâce à ce qu'on appelle l'effet de serre, une température moyenne favorable à la vie, cette température constituant, avec la pression atmosphérique, la présence d'oxygène et d'eau l'ensemble des conditions de la vie terrestre.

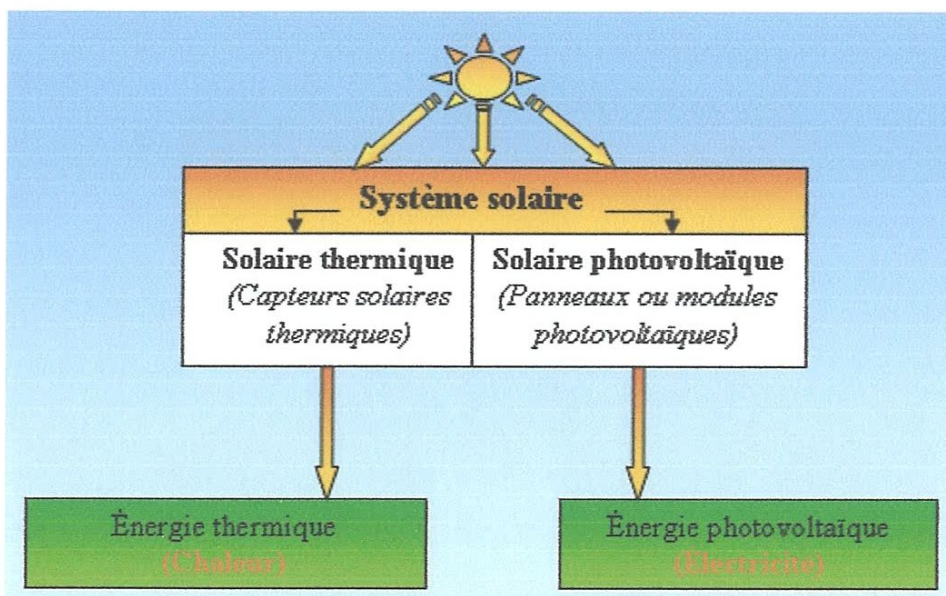


Figure I.3: Système solaire

**B-Photo voltaïque**

Produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module). Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire sont appelés champ photovoltaïque [9].



Figure I.4: 1-Cellule PV

2- Panneau

3-Champ PV

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement.



Figure I.5: le silicium

Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers). Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, As, Sb ou B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de deux ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

### C-Principe de fonctionnement des cellules solaire

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement *dopée de type n* et *dopée de type p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*. Une jonction PN a été formée.

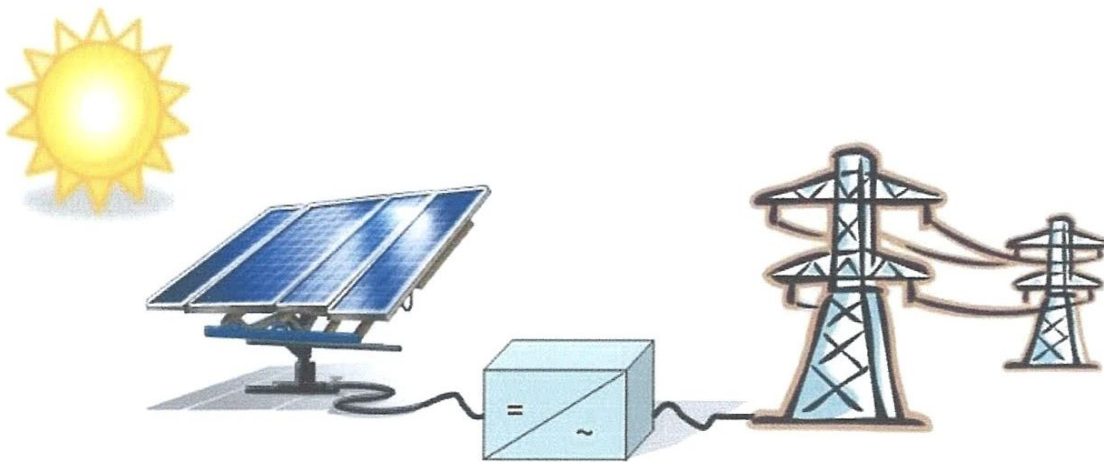


Figure I.6: Principe de fonctionnement des cellules solaires

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

#### **I.4.3.2. L'énergie éolienne**

Une éolienne est une machine permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de type éolienne. Cette énergie mécanique éolienne a été utilisée au cours des âges pour pomper l'eau ou moulin le grain [7].

Les machines actuelles sont utilisées pour produire de l'électricité de type éolienne qui est consommée localement (sites isolés), ou injectée sur le réseau électrique (éoliennes connectées au réseau).



**Figure I.7:** énergie éolienne

#### **A-Principe de fonctionnement d'une éolienne**

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui sont-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne. L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne.



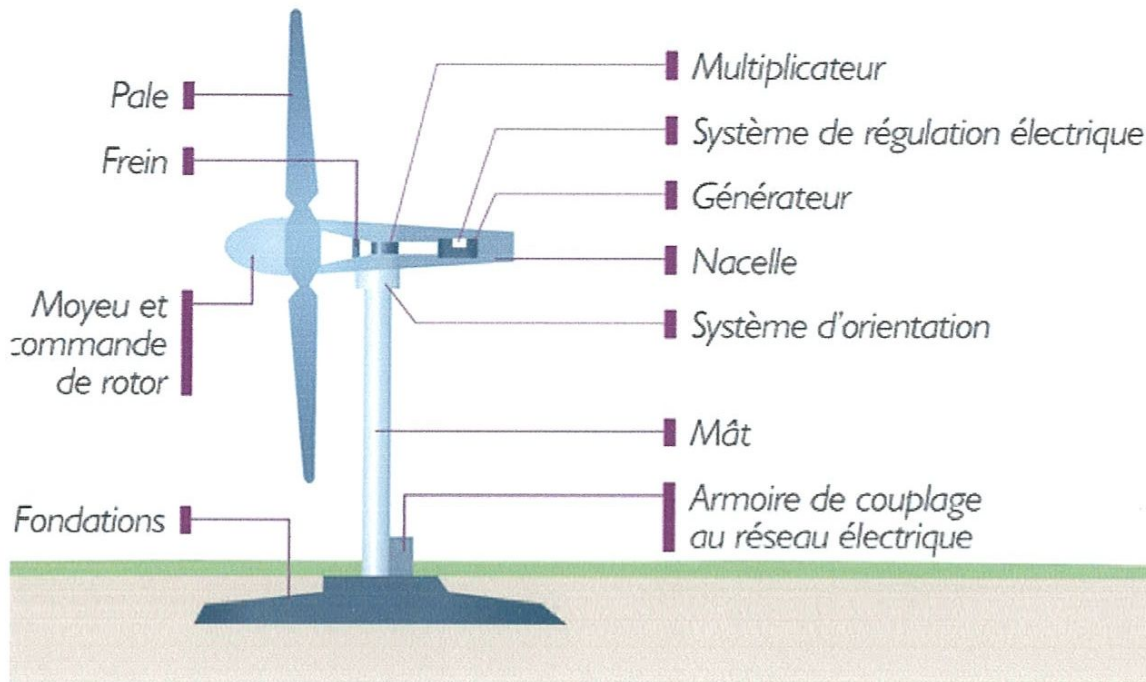


Figure I.8: Les compositions d'une éolienne

### B-Composition d'une éolienne

- Ailes ou pales d'une éolienne

Les éoliennes modernes sont composées de 2 à 3 ailes, tournant autour d'un rotor à axe horizontal. Les pales de l'hélice d'une éolienne peuvent être en bois lamellé-collé, en plastique renforcé de fibre de verre, ou en métal... Le diamètre qu'elles balaient varie de 40m à 120 m.

- La tour ou le mât d'une éolienne

L'hélice de l'éolienne est située en haut d'une tour de 50 m à 110 m. le mât peut être des assemblages de croisillons métalliques, en béton ou en métal.

- La partie électrique d'une éolienne

Dans les éoliennes destinées à produire de l'électricité, l'hélice fait tourner un générateur électrique situé en haut de la tour, dans le prolongement de l'axe de l'hélice de l'éolienne.

Entre l'hélice et le générateur électrique de l'éolienne se trouve en général un multiplicateur de vitesse, car l'hélice de l'éolienne tourne à des vitesses d'environ 100 à 650 tours min alors qu'un générateur électrique doit être entraîné à environ 1500 à 3000 tours min.

**I.4.3.3. L'énergie hydraulique**

Les centrales hydrauliques fonctionnent grâce à l'énergie potentielle de pesanteur de l'eau des rivières, des lacs ou des fleuves. La puissance produite dépend de la chute et du débit d'eau. Pour la production décentralisée, des microcentrales hydrauliques sont employées avec un ordre de grandeur de puissance de 5MW. Ce type de production présente comme avantages la gratuité de l'énergie primaire et la production électrique. Les inconvénients principaux sont le prix élevé de l'investissement initial.

**A-Petites centrale hydrauliques**

Leur principe de fonctionnement est identique à la centrale hydraulique centralisée traditionnelle.

La différence consiste à leur petite taille. Elles sont installées proches des consommateurs pour exploiter les petits fils d'eau locaux. Le niveau de puissance va de quelques kW à quelques MW.

**B-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.

Les sortes d'hydroliennes anglaises de (Sea Genent) ont une capacité de 1,2MW.

Les courants marins représentent une énergie fabuleuse qui contrairement aux vents sont constants et prévisibles.

**C-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 engorgement du site.

**I.4.3.4. L'énergie biomasse**

Une centrale électrique à biomasse produit de l'électricité et de la chaleur par combustion de la biomasse dans une chaudière. Les types les plus communs de chaudières sont des chaudières à eau chaude et des chaudières à vapeur.

La biomasse permet en général de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de plus de 80 %.

La production, le traitement et le transport de la biomasse génèrent des émissions de CO<sub>2</sub> dans la chaîne d'approvisionnement. La production d'électricité par la biomasse produit des gaz de combustion qui doivent être nettoyés avant d'être émis dans l'atmosphère. Ceci est fait en utilisant des techniques bien établies telles que le lavage des gaz de combustion et les filtres à particules.

Il existe trois familles pour la biomasse :

- La biomasse lignocellulosique, (ou lignine) comprenant principalement le bois, les résidus verts, ainsi que la paille. Leur utilisation est faite à partir d'une combustion, ou conversions thermochimiques.
- La biomasse à glucide, utilisant la canne à sucre, les céréales et les betteraves sucrières. On favorise ces constituants par une méthanisation (C'est un processus naturel biologique de dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène), ou encore par distillation, conversions biologiques.
- La biomasse oléagineuse, qui est riche en lipide. Ses composants sont le colza, ainsi que le palmier à huile. Cette catégorie de biomasse est appelé "Biocarburants". Ces carburants sont récoltés suite à de nouvelles transformations chimiques, et en ressort sous deux formes : Les esters d'huile végétale, et sous la forme de l'éthanol.

#### **I.4.3.5. L'énergie géothermique**

Le principe de la géothermie consiste à puiser dans une nappe phréatique ou le plus souvent à prélever l'énergie gratuite contenue dans le sol pour chauffer une habitation, cette énergie est constamment renouvelée par la nature, le soleil, le vent, la pluie. C'est donc une énergie renouvelable.

Ce transfert d'énergie de l'extérieur vers l'intérieur est assuré par deux échangeurs (1,2) et un générateur (3) :

- L'évaporateur est un échangeur de chaleur qui prélève l'énergie dans le sol celui-ci est soit constitué de tuyaux en PEHD (tuyauterie souple) ou circule un fluide caloporteur (eau glycolée) formant une nappe horizontale soit par un forage intégrant un échangeur vertical ou encore en prélevant la chaleur de l'eau directement dans une nappe phréatique.

Le milieu où l'on prélève l'énergie est appelée la source froide.

- Le condenseur restitue cette énergie souvent par un chauffage au sol c'est-à-dire des tuyaux intégrés dans une Chape avant carrelage ou de ventilo-convecteurs (air pulsé),

ou encore des radiateurs basse température. Le milieu où l'on restitue l'énergie est appelée la source chaude.

- Ce transfert d'énergie est possible grâce à un générateur de type pompe à chaleur.

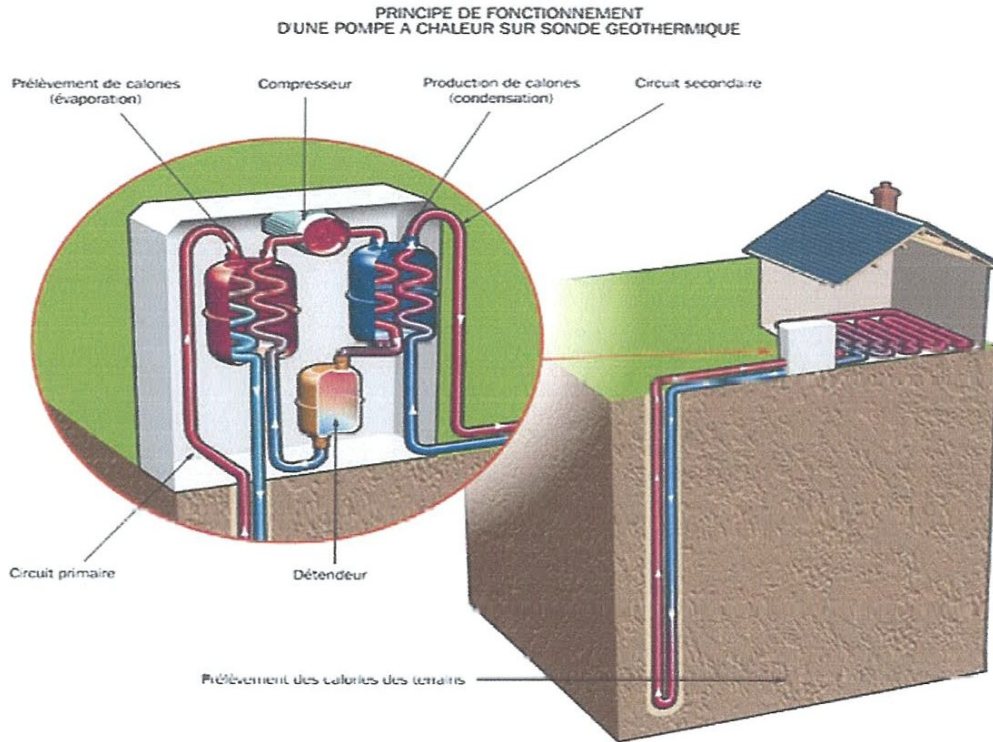


Figure I.9: Energie géothermique

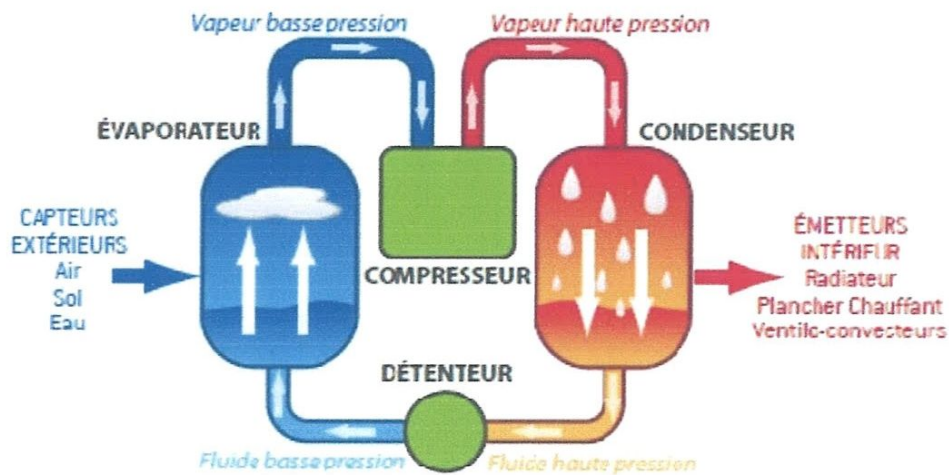


Figure I.10: pompe à chaleur

**I.5. Apports potentiels de la production décentralisée**

Strictement liés aux aspects d'économie, d'écologie et de dynamique de ces nouveaux producteurs, les avantages de l'insertion des GED dans le système électrique sont à rappeler, parmi lesquels : [4]

➤ **L'aspect environnemental**

Les productions basées sur les énergies nouvelles et renouvelables sont moins polluantes que celles à base de l'énergie fossile et nucléaire. C'est pour cette raison qu'actuellement, l'aspect environnemental représente un avantage des GED de petite et moyenne puissance en tenant compte des raisons écologiques et de l'obligation du protocole de Kyoto sur l'émission de gaz à l'effet de serre. Pourtant, l'apparition de parcs éoliens de grande capacité dans le futur pourra devenir source de pollution en termes de bruit et de modification des paysages dues à l'espace important qu'ils occupent. En outre, pour faire face à des fluctuations de la production éolienne, le système doit augmenter exorbitamment la réserve tournante, et par conséquent, augmenter indirectement les émissions liées à la nécessité de maintenir en service des unités conventionnelles. L'utilisation mixte et complémentaire des éoliennes avec d'autres types de GED ainsi qu'avec des sources classiques devrait apporter la solution pour cet aspect.

➤ **Le temps de construction des installations**

Pour les installations de production centralisée il faut compter de 7 à 10 ans, voire plus dans le cas de construction des grandes centrales hydroélectriques ou nucléaires. Par contre, un projet d'installation de production décentralisée peut être assez court (jusqu'à moins de 6 mois).

➤ **Le coût d'installation et d'entretien**

Pour les grandes productions centralisées, en dehors des coûts importants liés à la construction propre de l'installation, il faut compter aussi le surcoût lié à des infrastructures spécialement construites nécessaires pour les travaux (les routes, les lignes dédiées, etc.). Par contre, le coût d'un projet de production décentralisée peut être accessible à des petites entreprises, ce qui favorise la diversité dans la production électrique et active la compétition.

➤ **La réponse rapide à l'évolution de consommations locales**

Les productions décentralisées de type conventionnel peuvent être placées là où il y a un besoin d'énergie. Elles permettent de réduire les pertes, et éventuellement, de retarder les investissements pour renforcer les infrastructures du réseau.

➤ **Le prix des énergies primaires :**

Sur ce point, les productions décentralisées à base d'énergies nouvelles et renouvelables prennent l'avantage devant les productions à base d'énergie fossile. Surtout, si on considère le prix de l'énergie fossile dans le contexte actuel où il y a une menace d'épuisement de ce type d'énergie et une augmentation incessante du prix de pétrole au cours de ces dernières années.

➤ **L'aspect opérationnel :**

Comme les productions décentralisées sont souvent de capacité petite et moyenne, elles sont beaucoup plus dynamiques et rapides pour mettre en service l'énergie au réseau.

## **I.6. 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 II**

*Le réseau électrique*

*De distribution*



## **II.1. Introduction**

Les réseaux de distribution électrique n'ont cessé d'évoluer depuis leur origine à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, tant du point de vue des techniques utilisées que celui de l'exploitation et des protections. La phase d'évolution engagée depuis quelques années compte parmi les plus radicales puisqu'elle introduit la production d'énergie électrique au sein même des réseaux de distribution en aval des postes sources. Cela n'est pas sans conséquences sur la sécurité et l'exploitation des réseaux, ainsi que sur la qualité de l'onde de tension délivrée aux clients.

Cette évolution, que l'on s'attend à voir s'accélérer au cours des prochaines décennies conduit à repenser les principes de fonctionnement, voire la structure même des réseaux de distribution afin de préparer l'insertion prochaine de production décentralisée avec des taux de pénétration très importants [10]

## **II.2. Fonctionnement des systèmes électriques**

Le développement à grande échelle des réseaux électriques s'est fait pendant les glorieuses trentaines, pour des raisons techniques et économiques, sous la forme d'un monopole verticalement intègre. L'énergie électrique étant alors et jusque dans les années 1990 produite de manière presque exclusivement centralisée, et consommée de manière totalement décentralisée. Cela a 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 repartis sur l'ensemble du territoire.

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension (225 kV et 400 kV) pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition (63 kV et 90 kV), puis de distribution (20 kV) d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension (230/400 V). Cette structure verticale "transport – répartition – distribution" est schématisée sur la (Figure II.1). Notons ici que la terminologie "réseau de répartition" tend à disparaître, ce niveau de tension étant généralement englobé dans le terme "transport" [11].

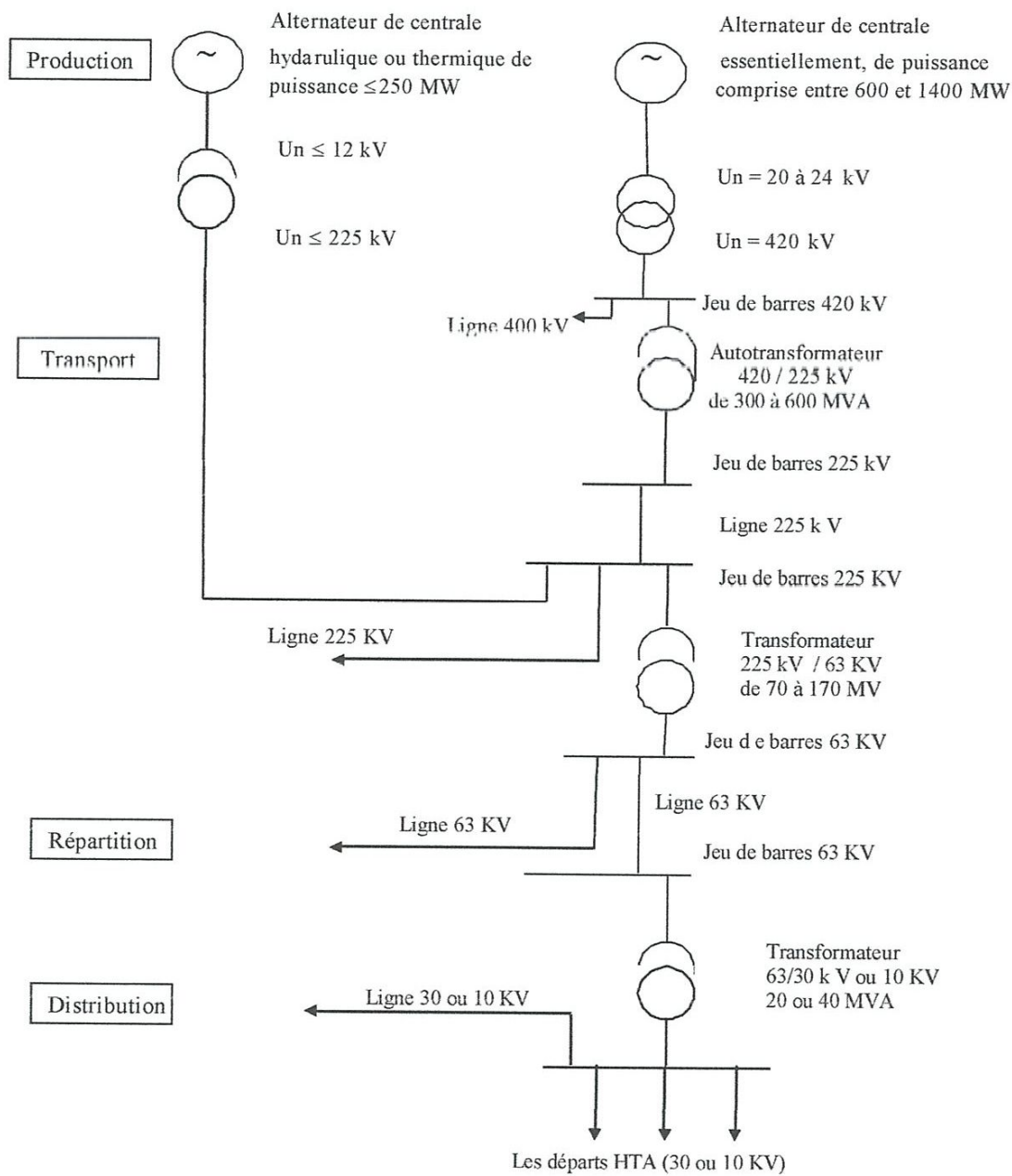


Figure II.1: Architecture générale de réseaux d'énergies électrique en Algérie

## Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension alternative le tableau (II.1) et la figure (II.1) :

**Tableau (II.1) :** Tableau des domaines de tension [12]

Domaines de Tension		Valeur de la tension composée nominale ( $U_n$ en Volts)
		Tension alternative
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$
Basse Tension (BT)	BTB	$50 < U_n \leq 500$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$
Haut Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 < U_n \leq 50000$
	HTB	$U_n > 50000$

### II.3. Le Réseaux de distribution

Les réseaux de distribution constituent l'architecture la plus importante du système électrique. Commencent à partir des tensions inférieures à 60 kV et des postes de transformation HTB/HTA avec l'aide des lignes ou des câbles moyenne tension jusqu'aux postes de répartition HTA/HTA. Le poste de transformation HTA/BTA constitue le dernier maillon de la chaîne de distribution et concerne tous les usages du courant électrique [4].

#### II.3.1. Réseaux de distribution à moyenne tension

- HTA (30 et 10 kV le plus répandu),
- Neutre à la terre par une résistance,
- Limitation à 300 A pour les réseaux aériens,
- Limitation à 1000 A pour les réseaux souterrains,
- Réseaux souterrains en boucle ouverte.

#### II.3.2. Réseaux de distribution à basse tension

- BTA (230 / 400 V),
- Neutre directement à la terre,
- Réseaux de type radial, maillés et bouclés.

## II.4. 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 II.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) [13].

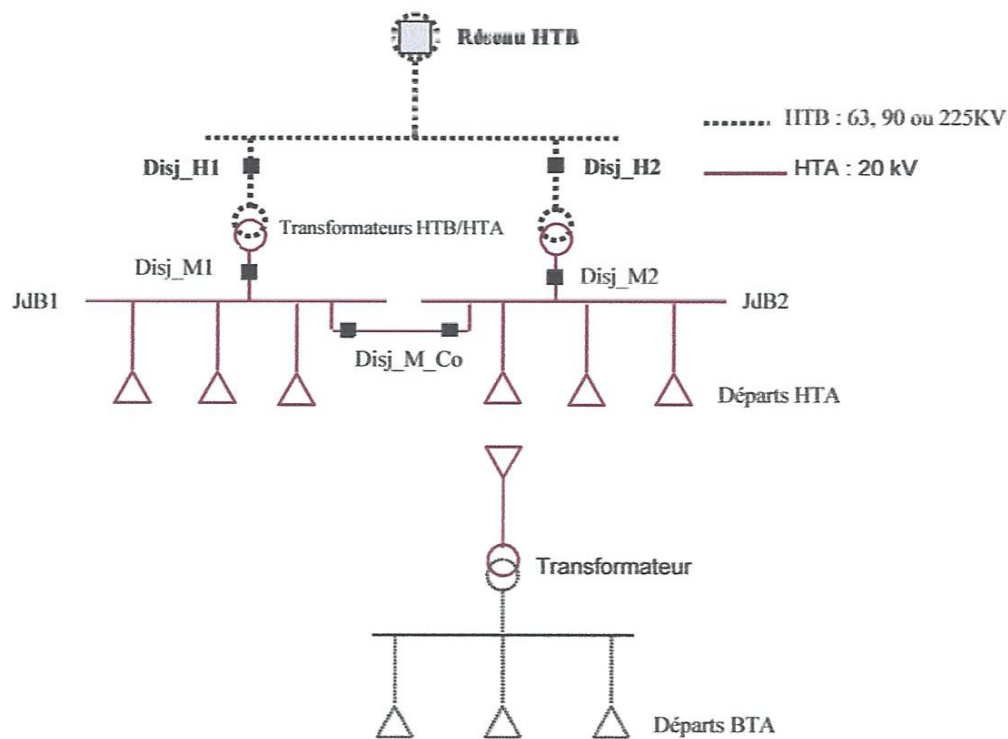


Figure II.2: Architecture générale du réseau de distribution HTA

### II.4.1. Caractéristiques techniques générales

Les réseaux de distribution constituent l'infrastructure la plus importante du système électrique car c'est l'interface finale qui mène à la plupart des clients. Ils sont exploités dans des gammes de tensions inférieures à 50 kV, soit le domaine de la HTA et de la BT.

En Algérie, la tension nominale des réseaux de distribution HTA est de 10 kV et 30 kV. Ces niveaux de tension permettent un bon compromis pour limiter les chutes de tension,

minimiser le nombre de postes source (poste de connexion HTB/HTA) et réduire les contraintes inhérentes aux hautes tensions (coûts des investissements, protection des biens et des personnes) [12].

Les réseaux de distribution sont, dans la très grande majorité des cas, exploités de manière radiale. Cette structure simplifie notamment le système de protections puisque le transit de puissance se fait de manière unilatérale du poste source (HTB/HTA) vers les postes HTA/BT et les consommateurs finaux pour la détection et l'élimination rapide des défauts et permet facilement d'assurer la maintenance du réseau, ainsi que le comptage de l'énergie aux postes sources. Des schémas d'exploitation de secours entre postes sources sont bien entendu prévus et permettent de minimiser le nombre de clients coupés en cas de défaillances.

## **II.4.2. Schémas d'exploitations**

### **II.4.2.1. Les postes sources HTB/HTA**

Les réseaux de distribution sont alimentés par un poste source HTB/HTA constitué en phase initiale d'un transformateur alimenté par une arrivée HTB (HT1) et alimentant lui-même un ou deux jeux de barres (Figure II.3.a) [12].

En seconde phase, avec l'augmentation des charges à desservir, un deuxième transformateur est ajouté formant avec le premier un groupe appelés transformateurs demi-rame et côté HTA, un autre jeu de barres alimente les différents départs du réseau de distribution. Les transformateurs fonctionnent en régime radial mais en cas de défaillances, il est possible d'isoler un des transformateurs et de répartir la charge sur celui qui reste sans dépasser en régime nominal normalement 50% de sa capacité maximale (Figure II.3.b).

Le poste est généralement raccordé à une deuxième arrivée HTB (HT2) appelée "garantie ligne".

En phase finale, un troisième transformateur et quelquefois plus est ajouté en double attache (Figure II.3.c).

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

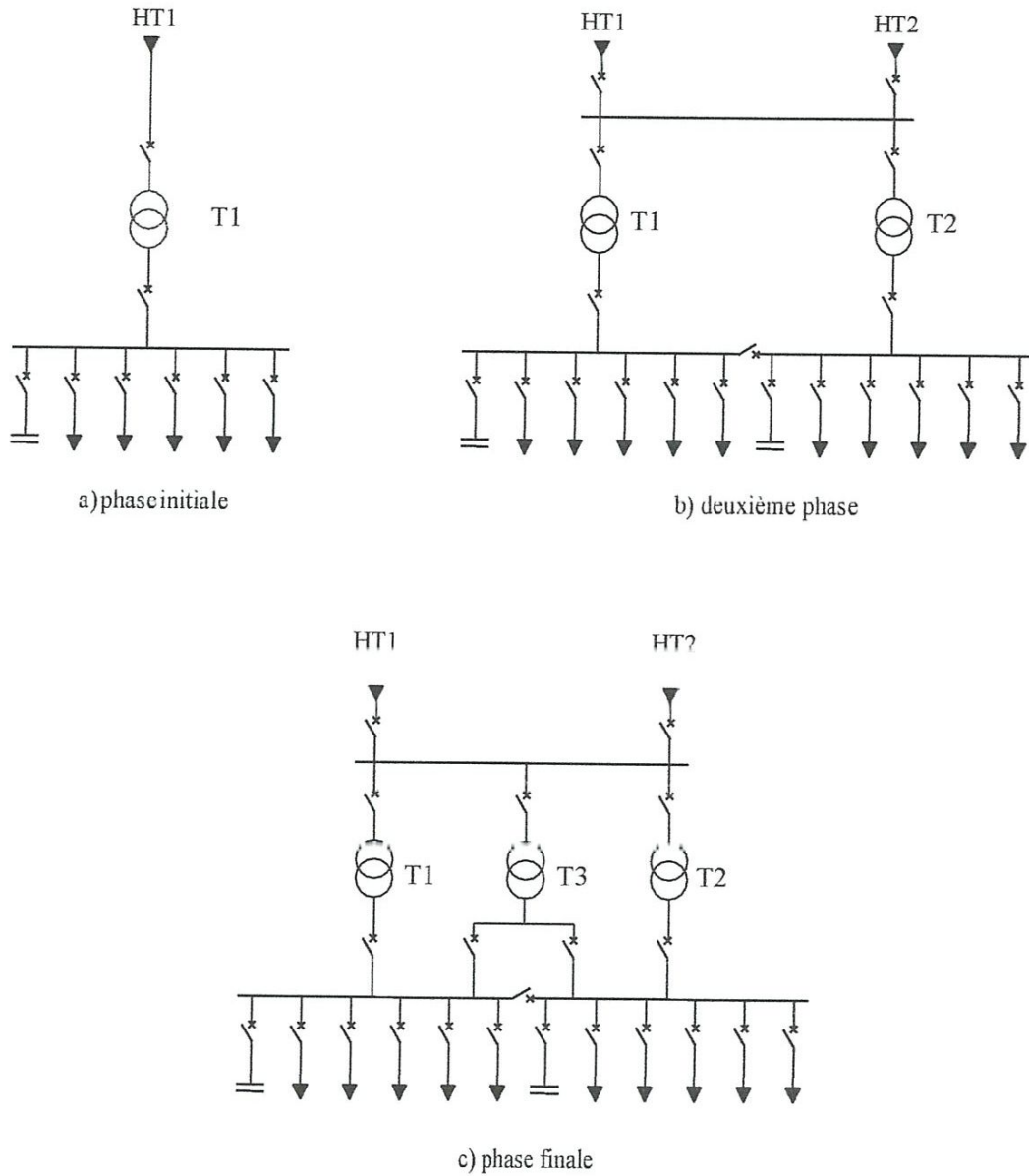
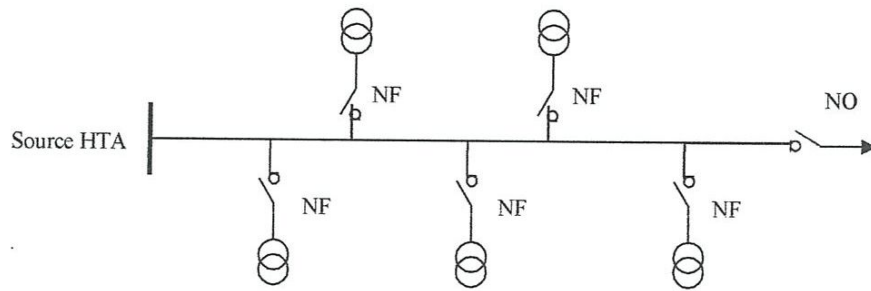


Figure II.3: Schéma de principe des postes sources HTB/HTA

#### II.4.2.2. Les lignes ou départs HTA

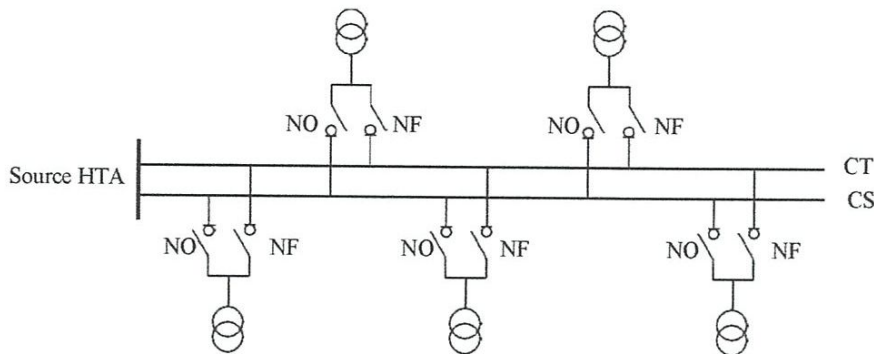
En milieu rural de faible densité, les réseaux de distribution sont principalement constitués de lignes aériennes en simple dérivation (figure II.4), traditionnellement moins coûteuses que les câbles enterrés. Le dimensionnement du réseau est lié aux chutes de tension maximales admissibles en raison de l'éloignement des charges à desservir.



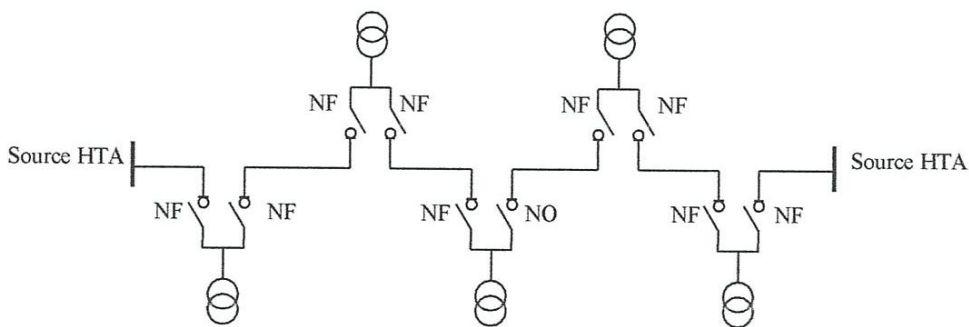
**Figure II.4:** Simple dérivation

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

Les réseaux de distribution en zones urbaines ou mixtes de forte densité de charge sont constitués principalement par des câbles HTA enterrés en double dérivation (Figure II.5) ou en coupure d'artère (Figure II.6) moins sensibles aux chutes de tension à cause de leur capacité homopolaire et de leur plus petite longueur. Le facteur impactant sur le dimensionnement des ouvrages souterrains est le courant maximum admissible dans les câbles du fait de la forte densité de charges à alimenter [12].



**Figure II.5:** Double dérivation



**Figure II.6:** Coupure d'artère

CT et CS sont respectivement câble de travail et câble de secours permettant de garantir la continuité du service en cas du défaut [4].

## II.5. Le raccordement de la PD au réseau de distribution

Le raccordement aux réseaux de distribution HTA 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 de la fréquence et la tension [14].

### II.5.1. Type de raccordement

Deux types de configuration de raccordement sont envisagés :

- **Le raccordement en départ mixte** : le raccordement à un départ existant auquel des consommateurs et éventuellement des producteurs sont déjà raccordés (Figure II.8.a).
- **Le raccordement en départ direct** : le raccordement au poste source le plus proche via un départ nouvellement créé pour le nouvel utilisateur (Figure II.8.b).

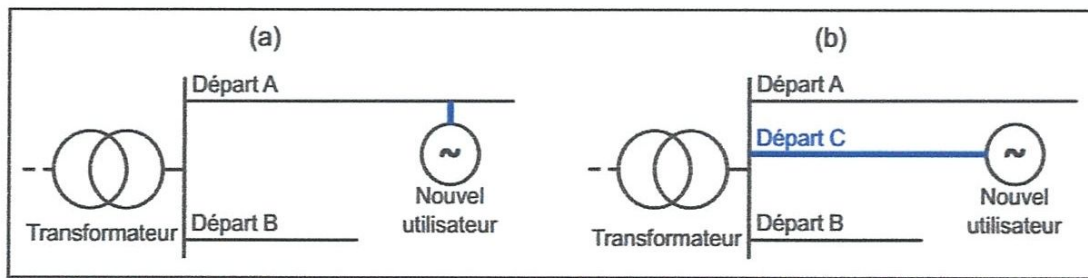


Figure II.7: Illustration des configurations de raccordement (a) en départ mixte (b) en départ direct

### II.5.2. La capacité d'accueil des réseaux de distribution

La capacité d'accueil en un nœud donné d'un réseau est la puissance de raccordement maximale qui respecte à tout moment les contraintes de tension et de courant sur l'ensemble du réseau considéré. Sous l'approche déterministe des études de raccordement des producteurs, la puissance de raccordement maximale  $P_{\text{raccmax}}$  en un nœud  $k$  correspond à la puissance maximale pouvant encore être injectée en ce nœud lorsque la production existante est maximale



et la consommation existante est minimale sur le départ considéré. La capacité d'accueil  $P_{raccmax}$  d'un départ de type rural ou semi-urbain, à la distance  $l$  du poste électrique (Figure II.8), peut donc être estimée à partir d'un modèle analytique du plan de tension d'un départ à grandeurs supposées uniformément réparties : [14]

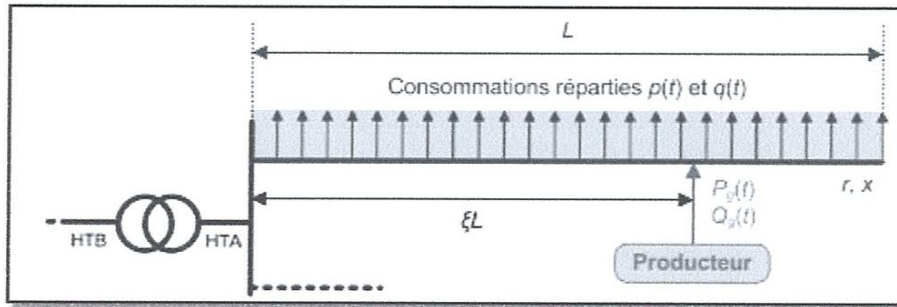


Figure II.8: Modèle d'un départ HTA

$$P_{raccmax} = \frac{U_{max}^2 - U_0^2 + (2 - 2)(R.P_{cmin} + X.Q_{cmin})}{2 (R + X.tang(\varphi))} \quad (II.1)$$

Avec  $\xi=l/L$ ,

- $L$ ,  $R$  et  $X$  : les longueur, résistance et réactance totales du départ ;
- $P_{cmin}$  et  $Q_{cmin}$  : les puissances actives et réactives minimales consommées sur le départ ;
- $\tan(\varphi)$  : la tangente phi de production associée à  $P_{raccmax}$  à la distance  $l$  ;
- $U_0$  : la tension au secondaire du transformateur amont ;
- $U_{max}$  : la tension maximale admissible à la distance  $l$  du poste électrique.

D'après l'équation (II.1), la capacité d'accueil dépend de paramètres très variés : les caractéristiques électriques du départ  $R$  et  $X$ , la tension en tête de départ  $U_0$ , les capacités constructives en puissance réactives du producteur  $\tan(\varphi)$  et la consommation minimale du départ  $P_{cmin}$  et  $Q_{cmin}$ .

## II.6. Conclusion

Nous avons exposé dans ce deuxième chapitre d'une manière brève sur les réseaux électriques et surtout la partie distribution avec son architecture et schémas d'exploitation.

L'objet principal d'un réseau de distribution est bien d'assurer une fourniture idéale de puissance pour les clients. Les demandes des clients en matière de consommation qui

augmente d'une manière incessante, a une influence importante sur les réseaux de distribution du fournisseur qui engendre une instabilité et surcharge sur ces réseaux.

La satisfaction des dites demandes reste un défi majeur pour le fournisseur. Dans le même contexte et dans le but de compenser cette insuffisance, des nouvelles sources d'énergie électrique décentralisée sont implantés dans les réseaux de distribution. Ces sources et leurs impacts sur le réseau de distribution sont l'objet du chapitre suivant.

## **Chapitre III**

### ***Effet de l'intégration de la production décentralisée au réseau électrique de distribution***

### **III.1. 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 [15].

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 [8].

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 [16].

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.

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.

## III.2. Impact de la production décentralisée sur le réseau de distribution

### III.2.1. Modification des transits de Puissance

Le réseau de distribution a été conçu pour amener l'énergie électrique au consommateur (recevoir les flux d'énergie du réseau de transport vers la distribution). L'insertion de la production décentralisée 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 [14].

La figure III.1 montre le sens de transit de puissance dans le réseau de distribution avant et après l'insertion des GED.

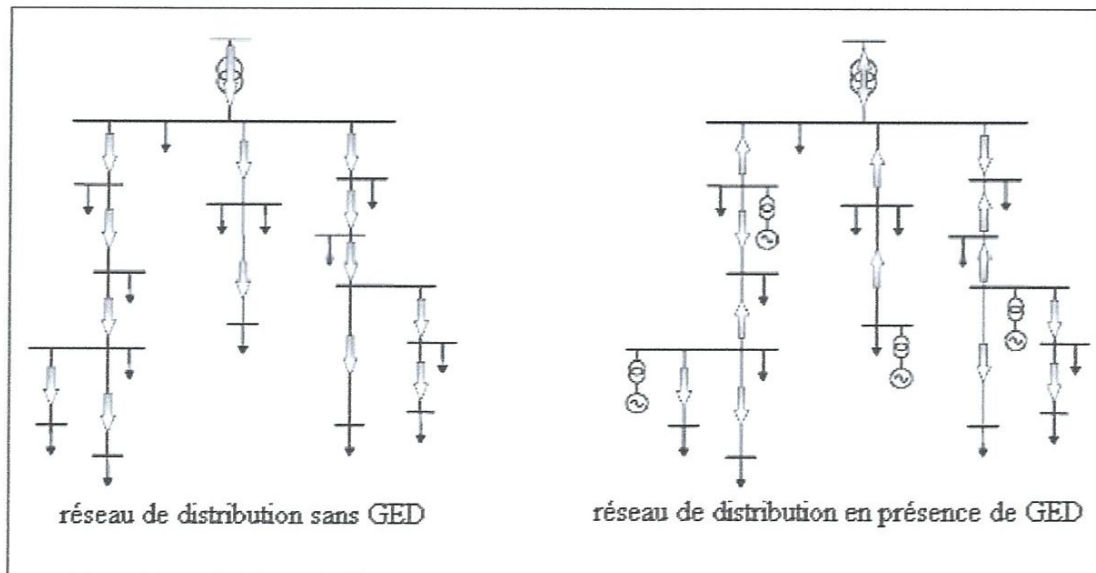


Figure III.1: Flux d'énergie sur un réseau de distribution en présence de GED

### III.2.2. Modification du plan de tension

Tout transit de puissance à travers une ligne va créer, du fait des impédances R et X de cette dernière, une chute de tension que l'on peut approcher par l'équation (III.1)

$$\Delta U = \frac{PR+QX}{U} \quad (\text{III.1})$$

La chute de tension  $\Delta U$  est donc liée aux puissances P et Q qui transitent par l'impédance de la ligne R, X. Cette formule est valable dans la convention récepteur, P étant la somme algébrique des puissances actives en aval de la ligne R, X, P consommée- P produite et Q la

somme algébrique des puissances réactives,  $Q$  consommée  $-Q$  Produite. On voit donc que client aura tendance à diminuer la tension alors qu'un producteur l'augmentera (Figure III.2).

Evidemment, la Production décentralisée, par un apport d'énergie à un point de connexion donné, va modifier le point de tension le long de la ligne existant auparavant.

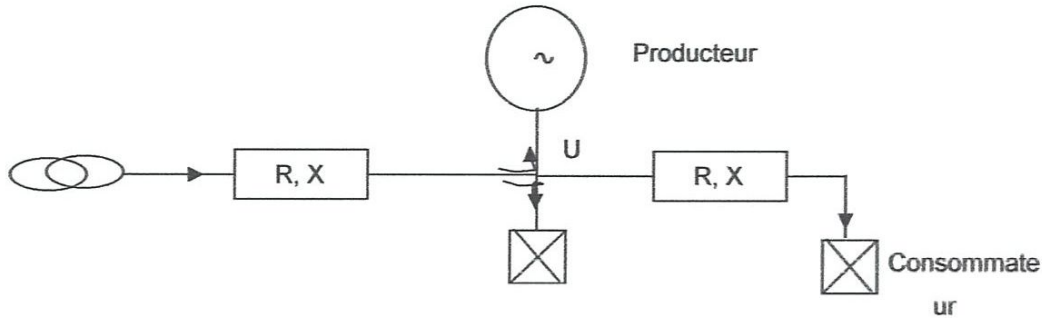


Figure III.2: Illustration de la chute de tension

### III.2.3. Impacts sur la qualité du système

L'effet de l'intégration de la GED sur la qualité de l'énergie concerne trois aspects majeurs :

- Les creux et l'élévation de la tension.
- Flicker.
- Les harmoniques.

#### III.2.3.1. Les creux et l'élévation de la tension

La production décentralisée peut affecter la qualité de la tension d'alimentation de plusieurs façons. En connectant la GED à une ligne de distribution légèrement chargée, le flux de puissance peut être inversé et la tension au point de connexion commence à augmenter, cela signifie que la tension d'alimentation des clients connectés à proximité des unités GED commence à augmenter aussi. Cette augmentation de tension a un effet stationnaire et dépend fortement du rapport  $X / R$ , de la charge et de la puissance injectée par la GED. Cependant, la GED peut également avoir un effet transitoire sur le niveau de tension [14].

Une variation rapide du courant d'une unité GED cause une augmentation ou diminution soudaine du courant de la ligne et donc un effet sur la tension de cette dernière. Par exemple, lorsque le vent commence à souffler, la production d'éoliennes augmente rapidement jusqu'à ce qu'elle atteigne sa valeur nominale. La variation rapide de la sortie d'éolienne change le flux

de la puissance dans la ligne et peut occasionner un transitoire de la tension, une variation brusque de la puissance également se produise dépasse une certaine limite supérieure, à ce stade l'éolienne se déconnecte afin de se protéger contre les surcharges et les forces mécaniques fortes. Cette déconnexion peut provoquer une augmentation du courant et par conséquent une chute de la tension d'alimentation [14].

### **III.2.3.2. Flicker**

Le terme Flicker désigne les variations de tension de courte durée apparaissant dans le réseau électrique et risquant de provoquer le scintillement des ampoules électriques à incandescence. Ce phénomène peut surgir si l'unité de production d'énergie renouvelable est raccordée à un réseau ayant une faible puissance de court-circuit, les variations fréquentes de son énergie primaire causant alors des variations importantes de puissance. Ce phénomène est surtout observé pour les éoliennes à vitesse constante, car il n'existe pas de tampon entre l'énergie mécanique en entrée et l'énergie électrique injectée au réseau [8].

### **III.2.3.3. Les harmoniques**

Les harmoniques de tension et de courant sont toujours présents dans un réseau de distribution. Ils sont essentiellement provoqués par la présence de charges non linéaires et de convertisseurs de puissance. Ces harmoniques provoquent une surchauffe de l'équipement, un fonctionnement défectueux du système de protection, et des interférences dans les circuits de communication. Les dispositifs d'électronique de puissance utilisés pour optimiser la puissance extraite des unités de production d'énergie renouvelable (éoliennes à vitesse variables et panneaux photovoltaïques) présentent l'inconvénient d'être des sources d'harmoniques [8].

### **III.2.4. 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 [3].

### **III.2.5. 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 [3].

### **III.2.6. Impacts sur la stabilité du système**

La régulation des réseaux électriques est l'ensemble des moyens mis en œuvre afin de maintenir les grandeurs de fréquences et de tension proches de leurs valeurs nominales sur l'ensemble du réseau.

La stabilité des réseaux électriques est une qualité de cette régulation par laquelle les situations modérément perturbées reviennent progressivement à un état d'équilibre.

Une instabilité généralisée du réseau peut conduire à des dégâts matériels et/ou à la mise hors tension d'une partie ou de l'ensemble du réseau.

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 [3].

### **III.2.7. 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 [3].

### **III.2.8. 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

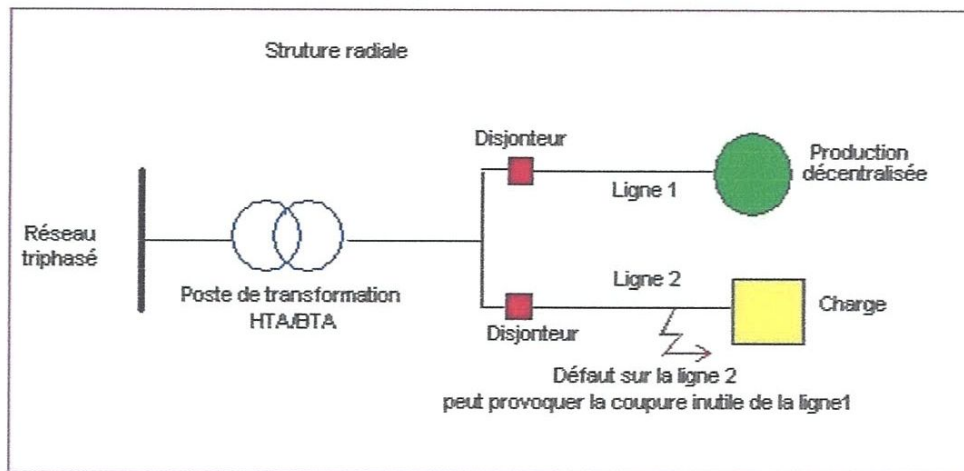


charge isolée du réseau suite à un incident, les protections par surintensité ne fonctionneraient pas pour éliminer un court-circuit dans le réseau. Ce problème pourrait systématiquement se rencontrer avec des systèmes photovoltaïques ou à piles à combustibles sur réseau isolé. Des précautions particulières sont à prévoir [5].

### III.2.9. 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.3 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 [5].

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 [5].



**Figure III.3:** Influence de la production décentralisée sur la sélectivité de la protection des réseaux de distribution

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 [5].

### III.2.11. Impact sur La tenue de fréquence

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 :

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

### III.2.12. Impacts sur le plan de protection

La modification des courants de court-circuit due à l'insertion de GED peut conduire à une modification du réglage des protections voire même à leur changement. Deux principaux problèmes apparaissent suite à une insertion de GED :

Le problème d'aveuglement de protections et celui déclenchement intempestif des protections [17].

#### ➤ Problème d'aveuglement des protections

Le problème d'aveuglement de protections se produit lorsqu'un défaut apparaît sur un départ possédant une GED. Ce problème est illustré sur la Figure III.4. En effet, en l'absence de GED, le seuil de la protection P2 est réglé à  $I_{\text{seuil P2}} = I_{\text{dr 1}}$  (courant de défaut provenant du réseau amont). Si on raccorde une GED, alors la GED va participer au courant de défaut.

Le courant de défaut apporté par le réseau amont,  $I_{\text{dr 2}}$ , est alors plus faible qu' $I_{\text{dr 1}}$  est donc inférieur au seuil de la protection P2 qui ne déclenche pas d'où le terme d'aveuglement.

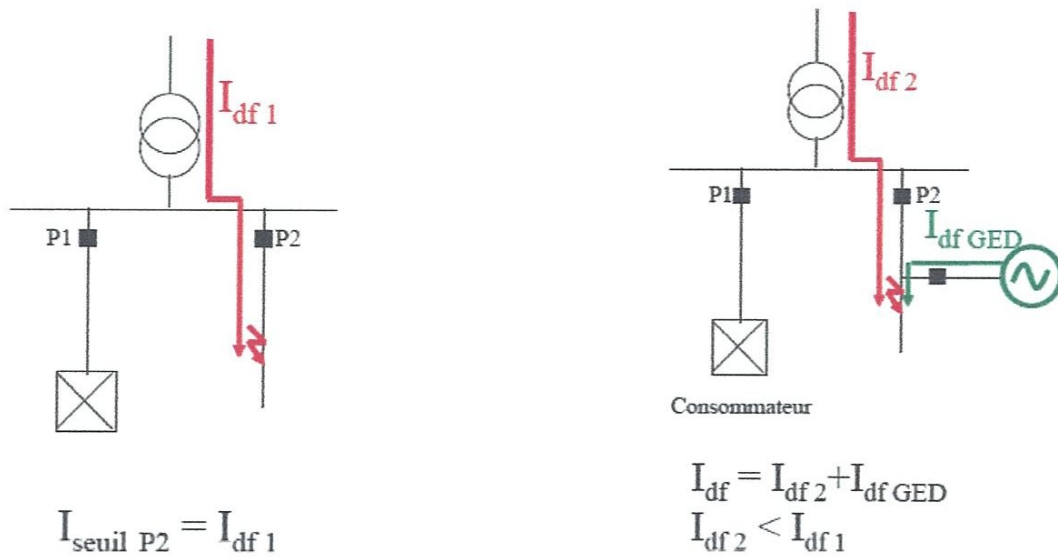


Figure III.4: Problème d'aveuglement de protections

➤ **Problème du déclenchement intempestif des protections**

Le problème de déclenchement intempestif (illustré sur la Figure) se produit lorsqu'un défaut apparaît sur un départ adjacent au départ possédant une GED. En effet, la GED participant au courant de défaut peut faire déclencher la protection P2 si le courant de défaut apporté par la GED est supérieur au seuil de la protection P2.

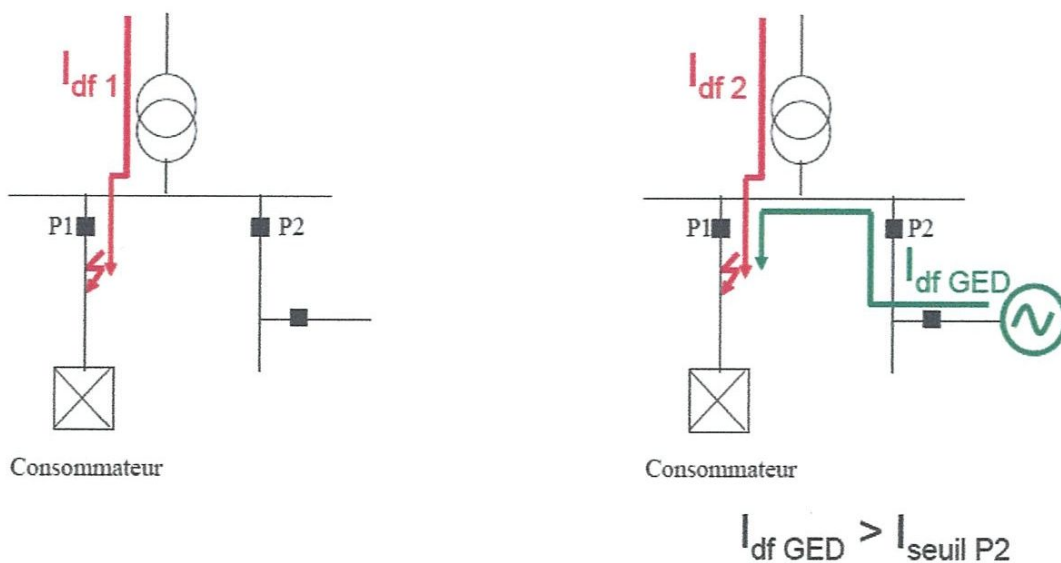


Figure III.5: Problème du déclenchement intempestif de protections

### III.3. Analyse de l'impact d'intégration de la production décentralisée au réseau de distribution

Afin d'analyser l'influence de l'insertion de la production décentralisée au réseau de distribution, nous allons effectuer un calcul d'écoulement de puissance dans un réseau radial à 6 jeu de barre afin d'évaluer les tensions et les puissances. Puis nous allons étudier l'impact de l'intégration d'un générateur PD au réseau. Nous allons voir son influence sur le comportement du réseau.

#### III.3.1. Réseau test

Le réseau étudié dans notre travail est constitué de 5 charges régulièrement espacées de 5Km consommant au total 10MW. Les conducteurs utilisés sont en aluminium et ont une section de 150 mm<sup>2</sup>. Les paramètres des conducteurs sont donc :  $r=0,206\Omega/\text{km}$  et  $X=0.1\Omega/\text{km}$ . Le nœud 1 représente le transformateur du poste source HTBIHTA (63kV/20kV) [18].

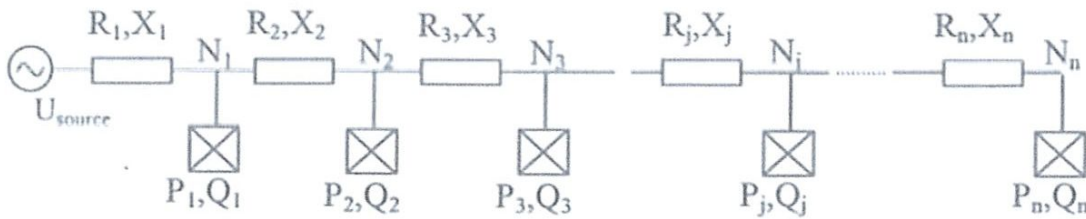


Figure III.6: Schéma du réseau étudié

#### III.3.1.1. Méthode de calcul de l'écoulement de puissance

Un réseau de distribution radiale est illustré dans la figure (III.7), avec n nœud et b (n-1) branches [18].

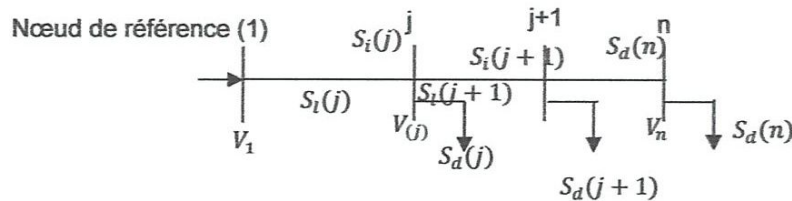


Figure III.7: réseau de distribution radiale

- Au nœud externe la puissance injectée est égale à la puissance demandée [18].

$$S_d(n) = S_i(n) \tag{III.2}$$

$$S_i(j) = S_d(j) + S_l(j+1) + S_i(j+1) \tag{III.3}$$

Avec ;

$S_i(j)$  Puissance injectée en amont ;

$S_i(j + 1)$  Puissance injectée en aval ;

$S_d(j)$  Puissance demandée ;

$S_l(j + 1)$  Puissance perdue sur le long de la branche.

$$S_l(i + 1) = abs \left( \frac{S_i(j+1)}{V(j+1)} \right) Z(j + 1) \quad (III.4)$$

Le courant injecté au (j+1) nième nœud est donné par :

$$I_i(j + 1) = I_i(j) - I_d(j) \quad (III.5)$$

L'équation (III.5) peut être écrite comme suit :

$$I_i(j + 1) = \left( \frac{S_i(j)}{V(j)} \right)^* - \left( \frac{S_d(j)}{V(j)} \right)^* \quad (III.6)$$

En appliquant la loi de Kirchhoff sur la figure (III.7), on trouve les tensions nodales :

$$V(j + 1) = V(j) - Z(j + 1)I_i(j + 1) \quad (III.7)$$

• **Algorithme de résolution**

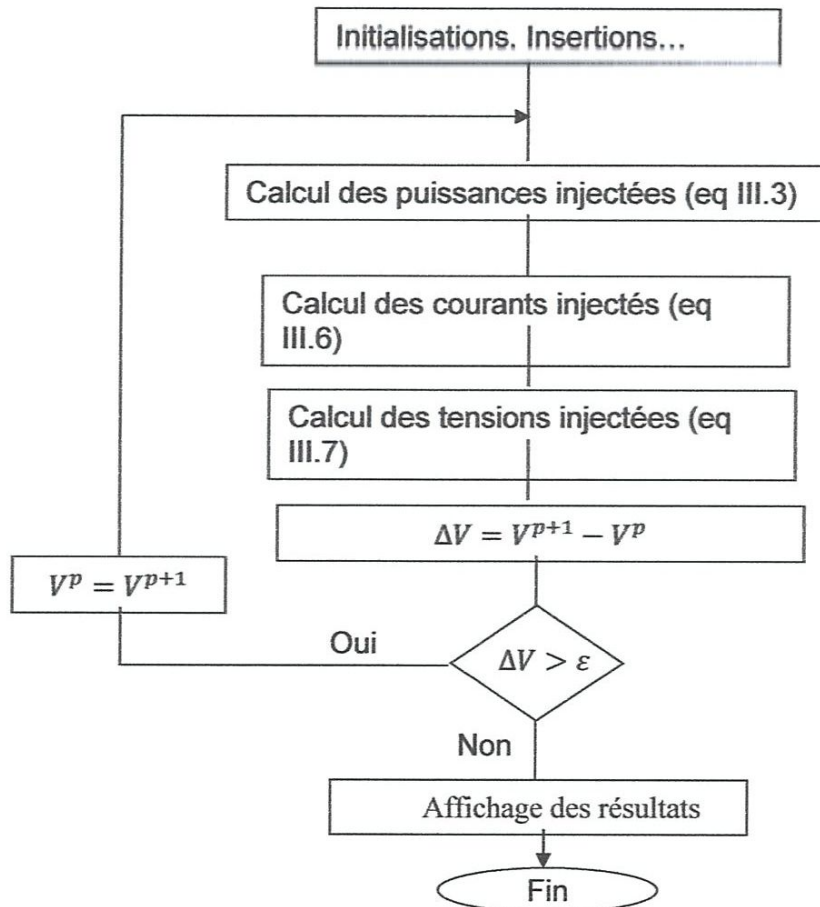


Figure III.8: Algorithme de Calcul de l'écoulement de puissance

### III.3.1.2. Calcul de l'écoulement de puissance

Le présent travail a été divisé en deux parties essentielles définies comme suit :

- Etudier l'état du réseau (tension aux nœuds, chute de tension et pertes de puissances dans les lignes).
- Etudier l'état du réseau avec insertion d'une production décentralisée.

#### A-Etat du réseau sans insertion de la production décentralisée

Cas 1 : Réseau sans production décentralisée.

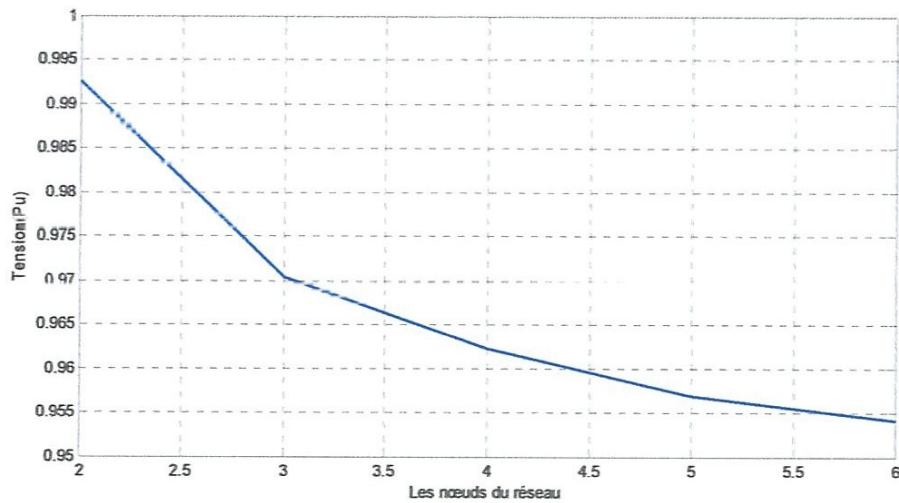


Figure III.9: Allure de la tension au niveau des 5 jeux de barre

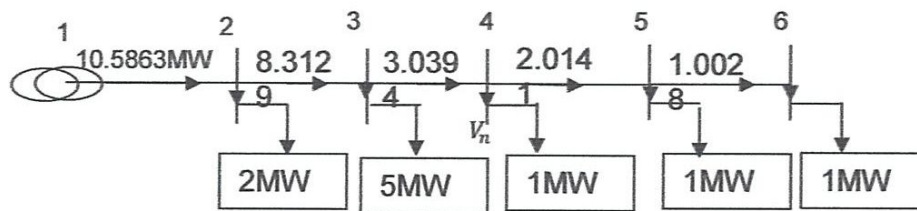


Figure III.10: Transit de puissance dans le réseau test sans PD

#### B-Etat du réseau avec insertion de la production décentralisée

Cas 2 : PD est connectée au nœud 6 (PD=2MW).

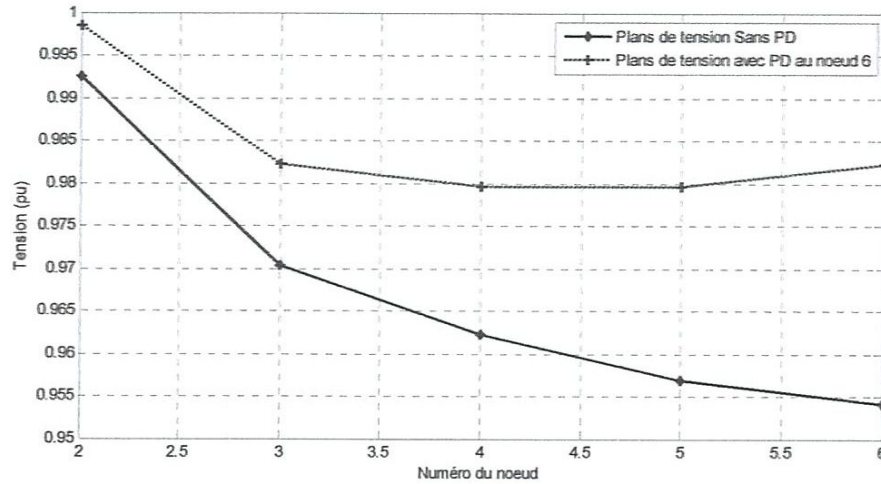


Figure III.11: Exemple d'effet bénéfique de l'insertion de GED dans le réseau test

Cas 3 : PD est connectée au noud 5 (PD=10MW).

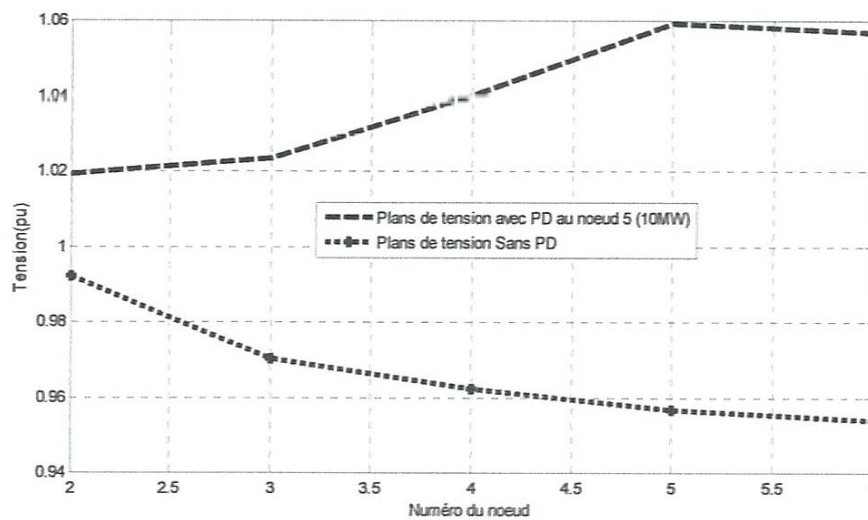


Figure III.12: Exemple de surtension provoqué par l'insertion de PD

Cas 4 : PD est connectée au noud 5 (PD=5MW).

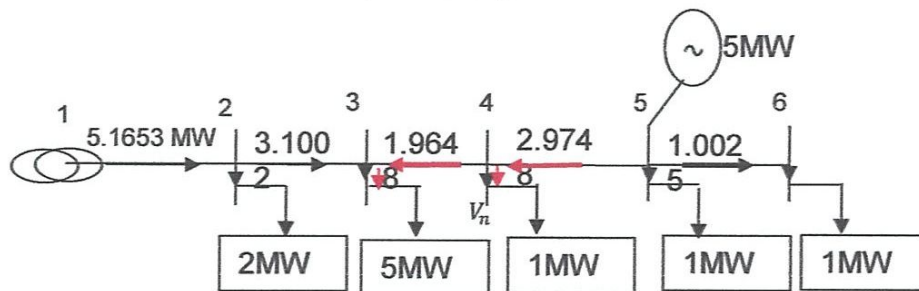


Figure III.13: Transit de puissance dans le réseau test avec une PD connectée au nœud 5

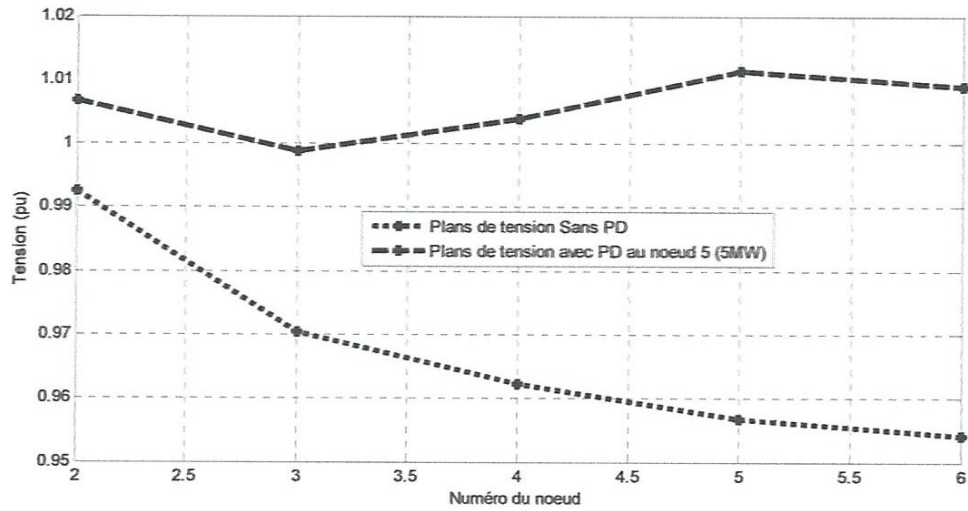


Figure III.14: Plan de tension provoqué par l'insertion de PD au noeud 5

Cas 5 : Deux PD sont connectées au réseau (5 (6MW) et 3(5MW)).

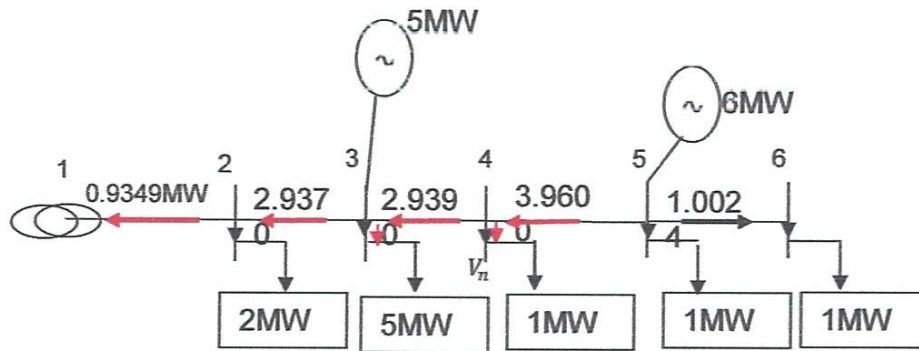


Figure III.15: Exemple d'une exportation de puissance vers le réseau de transport

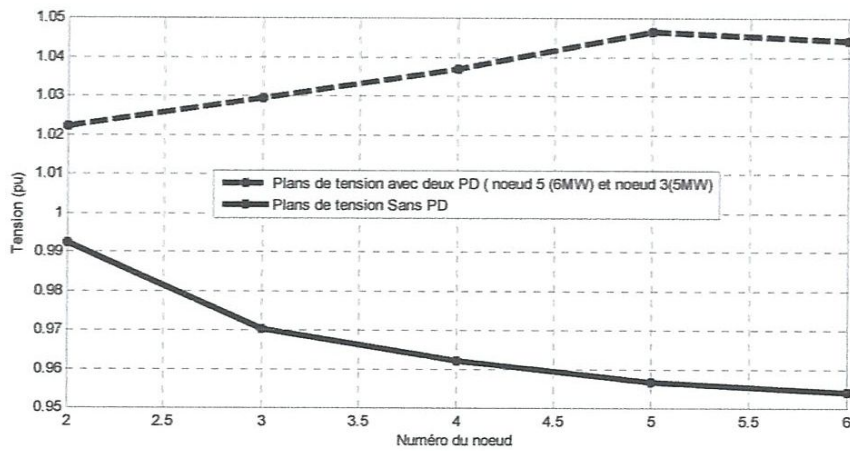


Figure III.16: Plan de tension provoqué par l'injection de deux PD au réseau test



### III.3.2. Interprétations

La figure (III.9) illustre l'évolution de la tension aux nœuds (2, 3, 4, 5, et 6) sans production décentralisée, le plan de tension est dans les limites admissibles. En connectant une production décentralisée de 2 MW au nœud 6, l'énergie est consommée plus localement que le cas sans production décentralisée. Le plan de tension avec une PD connectée permet dans ce cas de remonter la tension tout en restant dans les limites admissibles, ceci est bénéfique pour le réseau, car cela permet de diminuer les pertes (Figure III.11).

La figure (III.12) montre une surtension provoquée par une forte insertion de la production décentralisée. Une production décentralisée de 10 MW est connectée au nœud 5, l'exportation de puissance provoque une augmentation de la tension qui dépasse la limite supérieure admissible.

La connexion de PD sur le réseau de distribution modifie le transit de puissance dans le réseau. La figure III.10 illustre les transits de puissance obtenus dans sur ce réseau test sans PD. Les flux de puissance sont unidirectionnels et proviennent du côté source (réseau de transport). Par contre le flux de puissance devient alors bidirectionnel comme le montre la figure III.13, et les pertes sont réduites dans le cas d'une PD connectée au nœud 5 (Figure III.10) par rapport au cas d'une PD connectée au nœud 6. L'introduction de cette PD a donc diminué les pertes sur le réseau.

Aussi grâce à la production locale de cette PD, les transits de puissance active ont diminué et par conséquent les pertes également [19].

On peut se trouver dans une situation d'exportation d'énergie vers le réseau de transport. La Figure III.15 montre un exemple de cas d'exportation de puissance si on connecte, par exemple, deux PD l'une au nœud 5 de 6MW et l'autre de 5 MW au nœud 3.

### III.4. Conclusion

Nous avons vu, au cours de ce chapitre, différents impacts de la production décentralisée sur les réseaux électriques. Nous avons calculé, le flux de puissance dans un réseau de distribution radiale par une approche simple, afin d'évaluer les grandeurs électriques du réseau (tension et transit de puissance), et puis nous avons étudié son comportement vis-à-vis d'une intégration d'une PD sur le plan de tension et les puissances transitées.

## **Conclusion générale**

### *Conclusion générale*

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les impacts d'intégration des unités de production décentralisées au réseau de distribution.

L'insertion des productions décentralisées dans les réseaux de distribution pose de quelques problèmes à savoir :

- ✓ Influence sur la protection des réseaux de distribution
- ✓ Influence sur le plan de tension
- ✓ Tenue des équipements aux courants de court-circuit
- ✓ Influence sur la qualité de l'énergie.

Un ensemble de simulations numériques sous environnement MATLAB du fonctionnement d'un réseau radial à 6 jeux de barres, sans et avec production décentralisée a été réalisé afin d'évaluer l'impact de l'intégration d'une production décentralisée dans un réseau de distribution sur le profil de la tension et les puissances transportées.

## **Bibliographie**

---

---

**Bibliographie**

- [1] GERGES Georges, « l'énergie éolienne au Liban : bilan annuel, rendement et rentabilité », 6th international conférence on electromechanical and power Systems, Octobre 2007.
- [2] EL AIMANI Salma, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [3] Thi Thu Ha PHAM, « influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissances », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, octobre 2006.
- [4] DJABBOUR Abdelhakem et LARIBI Hamza, « Etude d'intégration d'une production décentralisée dans un réseau de distribution électrique », Mémoire de Master, Université de KASDI MERBAH OUARGLA, Juin 2017.
- [5] COMMISSION Ampere, « évaluation de la production décentralisée effets sur le réseau », Octobre 2000.
- [6] FONTELA GARCIA Miguel Angel, « Interaction des réseaux de Transport et de Distribution en Présence de production décentralisée », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, juillet 2008.
- [7] RICHARDOT Olivier, « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, Octobre 2006.
- [8] GUILLAUME rami, « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, Novembre 2006.
- [9] SADI Mohammed El Amine et HAMLAT Zohra, « L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV », Mémoire de Master, Université de Dr. Tahar Moulay de Saïda, Juin 2014.
- [10] B. RAISON et M. CRAPPE, « Intégration de la production décentralisée dans les réseaux électriques », Cours pour une formation destinée à l'ADEME, Service d'électrotechnique, Faculté polytechnique de Mons, 2001.
- [11] GHANEMI Nadir, « Etude de la tenue aux courant de court-circuit pour le raccordement d'une production décentralisée au réseau MT », Mémoire de magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.
- [12] KETFI Nadhir, « Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de génération d'énergie dispersée », mémoire de magister, Université de Batna, Décembre 2014.
- [13] KOUADRA Foued, « Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT », Mémoire de master, Université Mentouri de Constantine, 2015.

- [14] NACIRI Soukaina, « Impact de l'intégration des énergies renouvelables au réseau de distribution HTA », Mémoire de master, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Juin 2017.
- [15] MOGOS Emanuel Florin, « production décentralisée dans les réseaux de distribution. Etude pluridisciplinaire de la modélisation pour le contrôle des sources », Thèse de doctorat, l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2005.
- [16] GAZTAÑAGA ARANTZAMENDI Haizea, « étude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micro réseaux », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, 2006.
- [17] Marie-Cécile et Alvarez-Hérault, « Architectures Des Réseaux de Distribution du Futur en Présence de production décentralisée », Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble INPG, décembre 2009.
- [18] LOUNIS Anis, MADI Ahmed, « Développement d'une approche simple pour le calcul de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution », Mémoire de fin de cycle, université de Bejaia, 2016.
- [19] Paul Makanga Koumba, « étude d'intégration de sources d'énergie renouvelable à un réseau électrique autonome », mémoire présentée à l'université du Québec à Trois-Rivières 2013.