

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf-



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



LA PRODUCTION DECENTRALISEE

Présenté par :

M^{me} NAAMA BAKHTA

Année Universitaire : 2016 /2017

TABLE DES MATIERES

Avant-propos

INTRODUCTION GENERALE.....	01
I- GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES.....	03
I-1-Architecture des réseaux électriques.....	03
I-1-1-Production.....	03
I-1-2-Transport.....	04
I-1-3-Répartition.....	04
I-1-4-Distribution.....	04
I-2-Topologies des réseaux électriques.....	05
I-2-1-Réseau maillé.....	05
I-2-2-Réseau bouclé.....	05
I-2-3-Réseau radial.....	06
I-2-4-Réseau arborescent.....	06
I-3 Équipements et architectures des postes.....	06
I-3-1-Qualités recherchées d'un poste.....	07
I-3-2-Architectures des postes.....	08
I-3-3-Schémas des postes à couplage de barres.....	10
I-3-4-Postes de distribution BT.....	10
II- LA PRODUCTION DECENTRALISEE	12
II-1-Définition.....	12
II-2-Caractéristiques de Production Décentralisée	13
II-2-1- Systèmes à alternateurs classiques (machine synchrone).....	13
II-2-2- Systèmes à générateurs asynchrones.....	14
II-2-3-Systèmes à interface avec convertisseur électronique.....	14
II-3-Différents types de production décentralisée.....	14
II-3-1-Les moyens de productions d'énergie.....	14
II-3-1-1-La cogénération.....	15
II-3-1-2- Les énergies non renouvelables.....	16
II-3-1-3- Ressources énergétiques renouvelables.....	16
A) L'énergie solaire	17

B) L'énergie éolienne.....	20
C) L'énergie biomasse.....	22
D) L'énergie géothermique.....	22
E) L'énergie hydraulique.....	26
F) Les générateurs du futur : les piles à combustible (PAC).....	26
III-IMPACT DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE SUR LE RESEAU DE DISTRIBUTION	27
III-1-Impacts sur le sens de transit de puissance.....	29
III-2-Impacts sur la stabilité du système.....	29
III-3-Impacts sur la qualité de service.....	30
III-4-Impacts sur l'observabilité et de contrôlabilité du système.....	30
III-5-Impacts sur la continuité de service.....	30
III-6-Impacts sur le plan de protection.....	30
III-6-1-Influence du producteur sur la sensibilité et la sélectivité du plan de protection	31
III-6-2-Déclenchement intempestif d'un départ sain.....	31
III-6-3-Aveuglement de la protection du départ en défaut.....	32
III-6-4-Protection de découplage.....	33
III-7- Intégration de la GED sur les réseaux de distribution	33
III-7-1- Généralités.....	33
III-7-2- Étude de raccordement d'une installation	34
IV- LES RESEAUX ELECTRIQUES DU FUTUR-LES SMART-GRIDS.....	35
IV-1- Description générale.....	35
IV-2- Compteurs intelligents.....	36
IV-3 Maison intelligente et smart grids.....	36
CONCLUSION	38
BIBLIOGRAPHIE	39
Annexe A- Energie Eolienne	40
Annexe B- Panneau Solaire Photovoltaïque.....	41
Annexe C-Comparaison d'une Centrale Photovoltaïque (PV) de 5 MW avec une Centrale Electrique Classique (au charbon) de 5 MW.....	44

AVANT-PROPOS

Dans le monde, il existe différentes sources d'énergies utilisables afin de pouvoir répondre aux nombreuses demandes de la population mondiale, qui elle, augmente de jours en jours. Ces demandes énergétiques concernent les transports, le chauffage, ainsi que l'utilisation du téléphone ou même de la télévision. Cette utilisation de l'énergie a permis une amélioration du niveau de vie des populations des pays développés.

Dans ces différentes sources d'énergies, deux sortes se distinguent : les énergies dites non renouvelables et les énergies dites renouvelables. Ces énergies existent sous différentes formes. Elles peuvent être liquides ou gazeuse.

Ce document regroupe deux parties de cours, qui résume la production décentralisée de l'énergie électrique. Il est destiné aux étudiants des filières technologiques désirant réviser ou découvrir le domaine de la production décentralisée de l'énergie électrique.

INTRODUCTION GENERALE

Le mouvement mondial de désintégration et de recomposition qui touche dans la plupart des pays le secteur électrique, conduit à accroître les gains de productivité dans tous les domaines et tout particulièrement à utiliser les réseaux électriques plus près de leurs limites pour valoriser au maximum les actifs investis. Dans le même temps, la multiplication des acteurs du marché de l'électricité (producteurs indépendants, commercialisateurs, courtiers en énergie, etc.) et la séparation des rôles entre producteurs, transporteurs et distributeurs rendent plus complexes le développement et l'exploitation des systèmes électriques interconnectés. Il en résulte une attention toute particulière qui doit être portée à la sûreté et à l'économie de fonctionnement des systèmes électriques, non seulement pris globalement, mais aussi au niveau de leurs composants et de leurs sous-systèmes.

Les réseaux de distribution sont la dernière phase dans la procédure d'acheminement de l'énergie électrique à partir des centrales de productions aux consommateurs. Ils constituent conventionnellement des circuits électriques passifs dans lesquels les flux de puissance active et réactive s'écoulent des hautes vers les basses tensions. Ces flux ainsi que les tensions sont déterminés par les charges. Les systèmes de protection et le réglage de la tension sont actuellement basés sur ce caractère unidirectionnel de l'échange d'énergie.

Cependant, les incitations réglementaires en faveur des énergies renouvelables conjuguées à l'ouverture du marché de l'électricité ont eu un premier impact direct sur le réseau de distribution. Ce sont des raccordements de productions décentralisées sur ce réseau. Ceci va avoir des conséquences très importantes dans la mesure où les réseaux de distribution n'ont pas été conçus pour recevoir de la production. Avec ces dernières, le réseau de distribution devient un ensemble de circuits électriques actifs dans lesquels les flux de puissance et les tensions seront gouvernés non seulement par les charges, mais aussi par les sources. Les flux de puissance pourront fort bien, dans certaines conditions, remonter des basses tensions vers le réseau de transport.

Stimulée par des conditions favorables, la production décentralisée notamment à base d'énergie renouvelable pénètre de plus en plus dans le réseau électrique. Dans la mesure où

leur puissance est limitée et leur installation se situe majoritairement dans le réseau de distribution (la limite actuelle pour les raccordements HTA est de 12MW), ces producteurs sont généralement désignés sous le terme de "Génération d'Energie Dispersée" ou GED.

Il est prévu que l'insertion de la production décentralisée soit dans un avenir proche de plus en plus important. Plus le taux de pénétration des GED sera significatif, plus son influence sera particulièrement conséquente car ces moyens de production contribuent à davantage d'incertitudes et d'aléas et rendent le réseau plus fragile à cause de leur sensibilité.

En premier lieu, nous présentons une généralité sur les réseaux électriques, la structure et l'architecture des réseaux de distribution. En second lieu, nous démontrerons les différentes sources d'énergies -les énergies dites non renouvelables et les énergies dites renouvelables-et la production décentralisée avec les différents impacts, et pour finir, nous parlerons sur les réseaux électriques intelligents du future et les Maisons intelligentes.

I- GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

Les réseaux électriques sont considérés comme des infrastructures hautement critiques pour notre société. Ces réseaux sont conçus traditionnellement d'une manière verticale où les transferts de l'énergie suivent le schéma dit « du haut en bas » : Production -Transport-Distribution.

En effet, les réseaux électriques sont traditionnellement exploités d'une manière centralisée. Ainsi, la plus grande partie de la production électrique est centrée autour de centrales à grande capacité de production (type centrales hydrauliques, thermiques, nucléaires). Cette production est souvent liée à des emplacements géographiques adéquats (sources d'eau, impératifs techniques, ...). L'énergie est ensuite acheminée vers les grands centres de consommation à travers un réseau de lignes aériennes et de câbles, souvent à de grandes distances et à des niveaux de tension plus au moins importants. Cette structure a été construite sur des bases économiques, de sécurité du système et de qualité de fourniture de l'énergie.

I-1-Architecture des réseaux électriques

Un réseau électrique est un ensemble d'outils destiné à produire, transporter, distribuer l'énergie électrique et veiller sur la qualité de cette énergie, notamment la continuité de service et la qualité de la tension. L'architecture ou le design du réseau est un facteur clé pour assurer ces objectifs. Cette architecture peut être divisée en deux parties ; D'une part, l'architecture du poste, et de l'autre part l'architecture de la distribution.

I-1-1-Production

La production qui sert à produire l'énergie électrique grâce à des turbo-alternateurs qui transforme l'énergie mécanique des turbines en énergie électrique à partir d'une source primaire (gaz, pétrole, hydraulique...). Les sources primaires varient d'un pays à l'autre, exemple en Algérie le gaz naturel couvre plus de 70% de la production, en France, 75% d'électricité est d'origine nucléaire. En générale, chaque source de production (centrale électrique) regroupe plusieurs groupes turbo-alternateurs pour assurer la disponibilité pendant les périodes de maintenance.

Par ailleurs, on trouve dans les pays industrialisés des puissances installées de plus en

plus élevées pour répondre à la demande croissante en énergie électrique, exemple la central nucléaire de Gravelines en France 6×900 MW, la central hydro- électrique des Trois-Gorges en Chine 34×700 MW et 2×50 MW (devenue la plus grande central dans le monde en 2014).

I-1-2-Transport

Un alternateur produit la puissance électrique sous moyenne tension (12 à 15 kV), et elle est injectée dans le réseau de transport à travers des postes de transformation pour être transmise sous haute ou très tension afin de réduire les pertes dans les lignes. Le niveau de la tension de transport varie selon les distances et les puissances transportées, plus les distances sont grandes plus la tension doit être élevée, la même chose pour la puissance. Par exemple, le réseau de transport en Algérie utilise une tension de 220 kV (voir 400 kV pour certaines lignes dans le sud notamment), le réseau européen utilise 400 kV, et le réseau nord-américain 735 kV.

I-1-3-Répartition

Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des poste d'interconnexion THT/HT(MT) et sert fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à ré- partir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines. Ce type de réseau utilise des typiques 60 et 30 kV.

I-1-4-Distribution

La distribution sert à alimenter les consommateurs en moyenne ou en basse tension (typiquement 400V), grâce à des postes de transformation MT/BT.

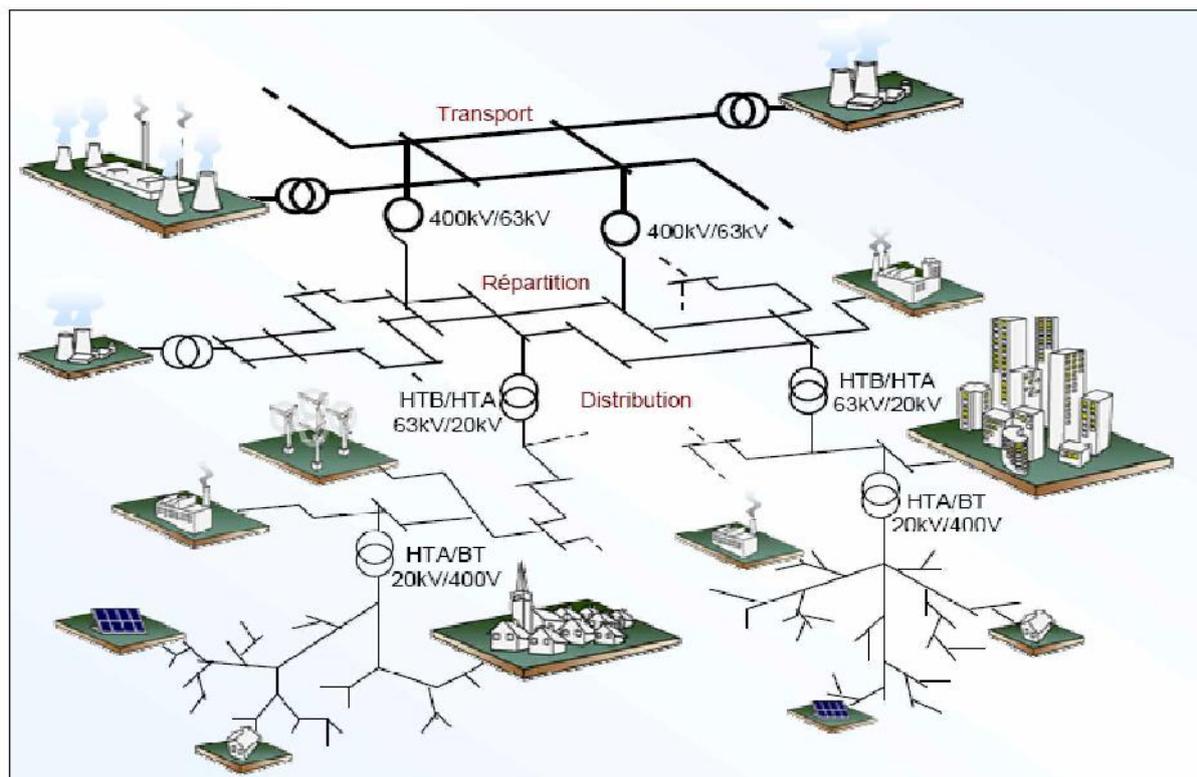


Figure 1 -Le réseau électrique

I-2-Topologies des réseaux électriques

Les topologies diffèrent d'un type de réseau à un autre. Cette topologie est dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation [1,2]. Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont illustrées sur la Figure 2.

I-2-1-Réseau maillé

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale.

I-2-2-Réseau bouclé

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre

eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés.

I-2-3-Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité.

I-2-4-Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT.

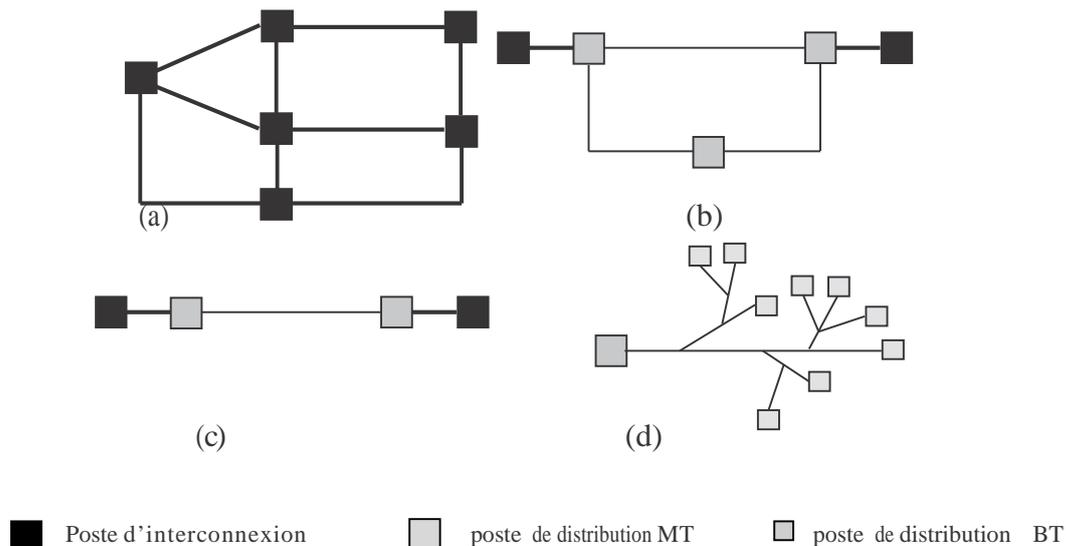


Figure 2 – Différentes topologies des réseaux électriques : (a) Réseau maillé, (b). Réseau bouclé, (c). Réseau radial, (d). Réseau arborescent.

I-3-Équipements et architectures des postes

Dans une analyse globale d'un réseau électrique un poste est considéré comme une barre ou tout simplement un nœud où transitent des flux de puissances. Pour le désigne et la planification du réseau, ce poste constitue une pièce majeure dans le système de répartition ou de distribution, dans la mesure où c'est à ce niveau qui est

organisée la configuration de la topologie du réseau, et c'est aussi un point de surveillance de contrôle et de protection [4].

Un poste électrique est un ensemble d'appareillage arrangé de sorte à :

- ✓ Faire transiter la puissance d'un niveau de tension à un autre, en général s'il s'agit d'un poste de répartition ou de distribution, le poste sert à baisser la tension ;
- ✓ Régler de la tension, comptage de puissance, surveillance, etc.

Cet ensemble d'appareillage comporte

- ✓ Des jeux de barres ;
- ✓ Des transformateurs ;
- ✓ Des disjoncteur et sectionneurs (appareillage de coupure) ;
- ✓ Des compensateurs ;
- ✓ Appareillage de mesure et de comptage de puissance ;
- ✓ autres.

I-3-1-Qualités recherchées d'un poste

Les qualités recherchées lors d'un choix d'architecture d'un poste électrique sont : La sécurité qui est l'aptitude à conserver un maximum de dérivations (départs) saines en service, en cas de non ouverture du disjoncteur chargé d'isoler une partie en défaut. La souplesse ou l'aptitude d'un poste à réaliser plusieurs découplages et y raccorder n'importe quels départs. Une maintenabilité permettant la poursuite de l'exploitation d'une dérivation malgré l'indisponibilité d'un disjoncteur, et finalement, une simplicité de sorte à pouvoir changer de configuration en manœuvrant le minimum d'appareils.

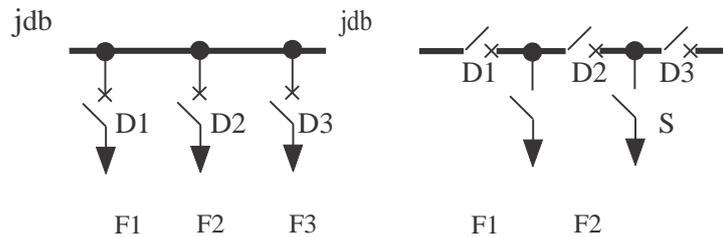
La focalisation sur une qualité donnée dépend du type de poste et des options d'exploitation. En règle générale, les postes THT et HT couvrent des très large zones, c'est pourquoi on favorise avant tout la sécurité. Pour les postes MT, la charge couverte est beaucoup moins importante, alors on favorise plutôt l'économie.

I-3-2-Architectures des postes

Le choix de l'architecture d'un poste dépend de plusieurs paramètres technico-économiques (Fiabilité, flexibilité, maintenance, les coûts d'investissement et de maintenance). La fiabilité et la flexibilité d'un poste sont déterminées par son architecture, et plus précisément du nombre et disposition des jeux de barres, nombre et disposition des appareils de coupure (disjoncteurs), et éventuellement des lignes qui alimentent le poste.

Les postes peuvent être classés en fonction de leurs architectures indépendamment de leurs types en deux familles ;

- ❖ **Poste à couplage de barres** où les jeux de barres couplent en eux les différents départs ;
- ❖ **Poste à couplage de disjoncteurs** où les disjoncteurs couplent entre eux les différents départs.



(a) Couplage de barres.

(b) Couplage de disjoncteurs

Figure 3 – Les deux principales architectures des postes. D : Disjoncteur, S : Sectionneur

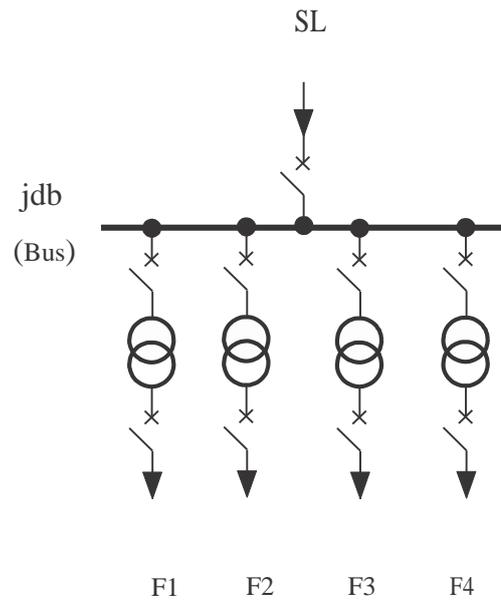


Figure 4 – Simple jeu de barres, simple antenne et plusieurs départs.

La Figure 3 montre la différence entre ces deux familles de postes. De point de vue fiabilité, on peut remarquer qu'un défaut sur le départ F1 par exemple nécessitera l'ouverture du disjoncteur D1 pour l'architecture à couplage de barre, alors que pour l'autre architecture il faudra ouvrir D1 et D2 pour isoler le départ en défaut. Cependant, en cas de maintenance de disjoncteur D1 le départ est F1 est condamné pour l'architecture à couplage de barre, mais peut rester en service grâce à D2 pour l'architecture à couplage de disjoncteurs. Donc, à la lumière de cette exemple, on peut dire que l'architecture à couplage de disjoncteur est plus fiable, cependant de point de vue coût, il est évident qu'elle revient plus chère du fait qu'il nécessite plus de disjoncteurs pour protéger le même nombre de départ (exemple : trois disjoncteurs pour trois départs dans une architecture à couplage de barres, le même nombre de disjoncteurs pour deux départs pour une architecture à couplage de disjoncteurs.).

I-3-3-Schémas des postes à couplage de barres

La Figure 4 représente le schéma d'un poste à couplage de barres simple souvent appelé simple antenne-simple jeu de barres. Ce schéma est constitué d'une ligne d'arrivée (SL) alimentant un jeu de barres sur lequel plusieurs départs sont raccordés pour alimenter des charges à travers des transformateurs normalement abaisseurs de tensions. Ce type de schéma a l'avantage d'être simple et économiquement pas cher, mais il présente plusieurs inconvénients de point de vue sécurité. En effet, il n'est pas difficile de remarquer qu'un défaut sur n'importe quel départ ou une maintenance l'un de ses équipements associés (disjoncteur ou transformateur), le mettra immédiatement hors service. D'autre part, un défaut sur le jeu de barres ou une maintenance de celui-ci condamnera tous les départs et mettra le poste hors service. Enfin, la perte de la ligne d'arrivée à cause d'un défaut sur la ligne, défaut ou maintenance de son disjoncteur entrainera encore la perte du poste.

I-3-4-Postes de distribution BT

Les postes de distribution basse tension (MT/BT) sont relativement plus simples. En termes de puissance, ce sont des postes qui ne dépassent pas 10 MW. Selon leurs puissances ils peuvent être soit mis sur poteaux (en zones rural surtout ou semi urbaine) soit dans des cellules maçonnés (zone urbaine). La Figure 5 montre deux schémas de poste de distribution BT ;

• **Poste MT/BT en zone rural ou semi urbaine**

- Le poste est alimenté côté MT par une arrivée aérienne simple, et alimente un ou plusieurs départs BT ;
 - L'organe de protection côté MT peut être un simple sectionneur ou un disjoncteur si le courant nominal est supérieur à 45 A.
- Le poste est soit mis sur le poteau pour des puissances faible (inférieures ou égale à 160 kVA, 63, 100, 160 kVA), soit dans une cellule au bas du poteau pour des puissances plus grandes 250 ou 400 kVA.

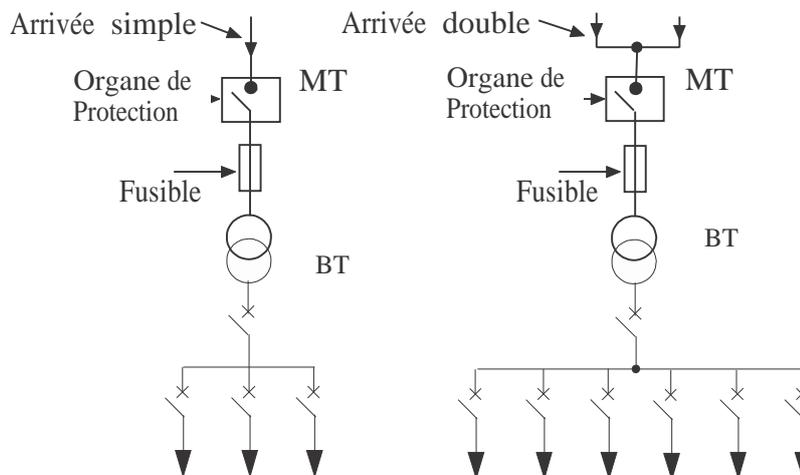


Figure 5 – Postes de distribution basse tension

• **Poste MT/BT en zone urbaine**

- ✓ Le poste est alimenté côté MT par une arrivée souterraine en double dérivation ou en coupure d'artère. Côté BT, souvent plusieurs départs ;
- ✓ L'organe de protection côté MT peut être un simple sectionneur ou un disjoncteur si le courant nominal est supérieur à 45 A.
- ✓ Le poste est obligatoirement mis en cellule maçonnée.

II- LA PRODUCTION DECENTRALISEE

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 » [5].

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 [6].

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 cogénération 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 CO₂, 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.

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.

II-2-Caractéristiques de Production Décentralisée [5]

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.

II-2-1- Systèmes à alternateurs classiques (machine synchrone) [5]

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 [5]

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

II-2-3- 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.

II-3- Différents types de production décentralisée

II-3-1- Les moyens de productions d'énergie

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.

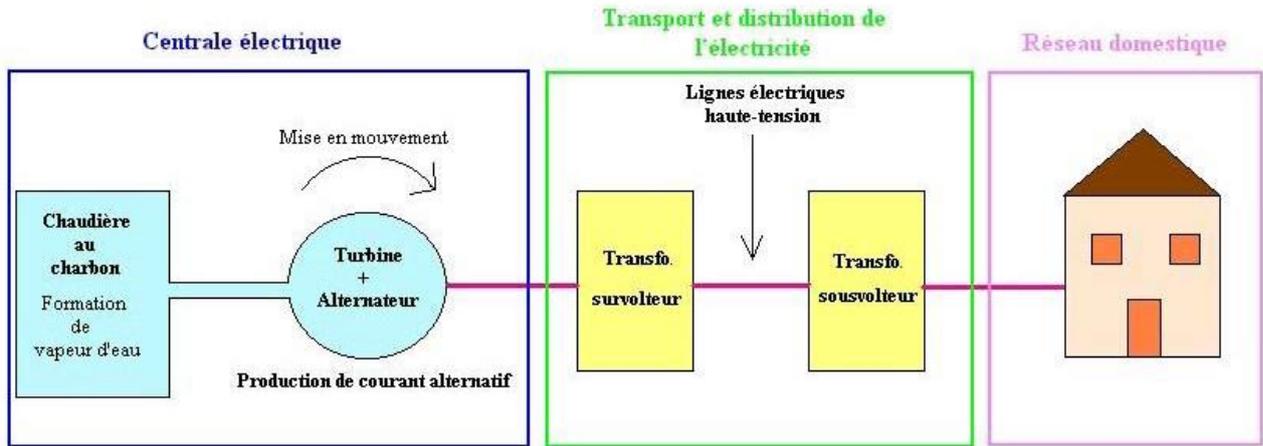


Figure 6 - L'électricité de la production vers la consommation.

L'électricité est un facteur essentiel au développement économique, dans tous les pays du monde. Son importance relative s'accroît avec les progrès techniques, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'augmentation de sa production est synonyme de sa qualité de vie et de création de richesse. La production d'électricité ramène au nombre d'habitants, est donc un bon indicateur permettant de mesurer les écarts de développement entre les différentes régions du monde.

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 :

II-3-1-1-La cogénération [1]

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.

II-3-1-2- 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 :

- 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 mégawatts.
- 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 mégawatt.

II-3-1-3- Ressources énergétiques 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) [7,8].

L'énergie solaire peut être exploitée sous différentes formes :

- 1) photovoltaïque : les photons sont convertis en courant électrique par un semi-conducteur
- 2) thermique : la chaleur de la lumière est absorbée par un capteur, puis concentrée grâce à une pompe à chaleur.

L'énergie éolienne est produite par la force du vent qui fait tourner les pales d'une éolienne. L'énergie dite mécanique est convertie en énergie électrique par une génératrice. La quantité

de vent détermine donc la quantité d'électricité produite. Le rendement de l'éolienne dépend de sa taille : si on augmente la hauteur du mât et la longueur des pales, la puissance disponible croît également.

La biomasse-énergie fait référence à l'ensemble de la matière végétale ou de déchets d'origine animale (bois, plantes, céréales, déchets agricoles,...) susceptible d'être collectée à des fins de valorisation énergétique.

L'énergie hydraulique est produite par la force de l'eau. Elle est exploitée grâce aux retenues d'eau des barrages, ou encore avec des centrales au fil de l'eau. L'hydraulique océanique, également appelée thalasso-énergie, connaît une croissance importante.

La géothermie utilise la chaleur de la Terre et l'exploite par différentes techniques, selon la profondeur à laquelle la chaleur est captée. Son usage est très ancien, et pourtant elle reste une énergie peu utilisée, malgré un potentiel important.

A) L'énergie solaire

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité 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)* photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés *champ photovoltaïque*. Le terme *photovoltaïque* peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.



*Cellule photovoltaïque
(Monocristalline)*

Panneau photovoltaïque

Champ photovoltaïque

Figure 7 – énergie solaire

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 quartzeux (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 8 – 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.

Principe de fonctionnement des cellules solaire



Figure 9- Principe de fonctionnement des cellules solaires

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.

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.

B) 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 moudre le grain [8].

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 10 – énergie éolienne

Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple : le vent fait tourner des pales qui font-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.

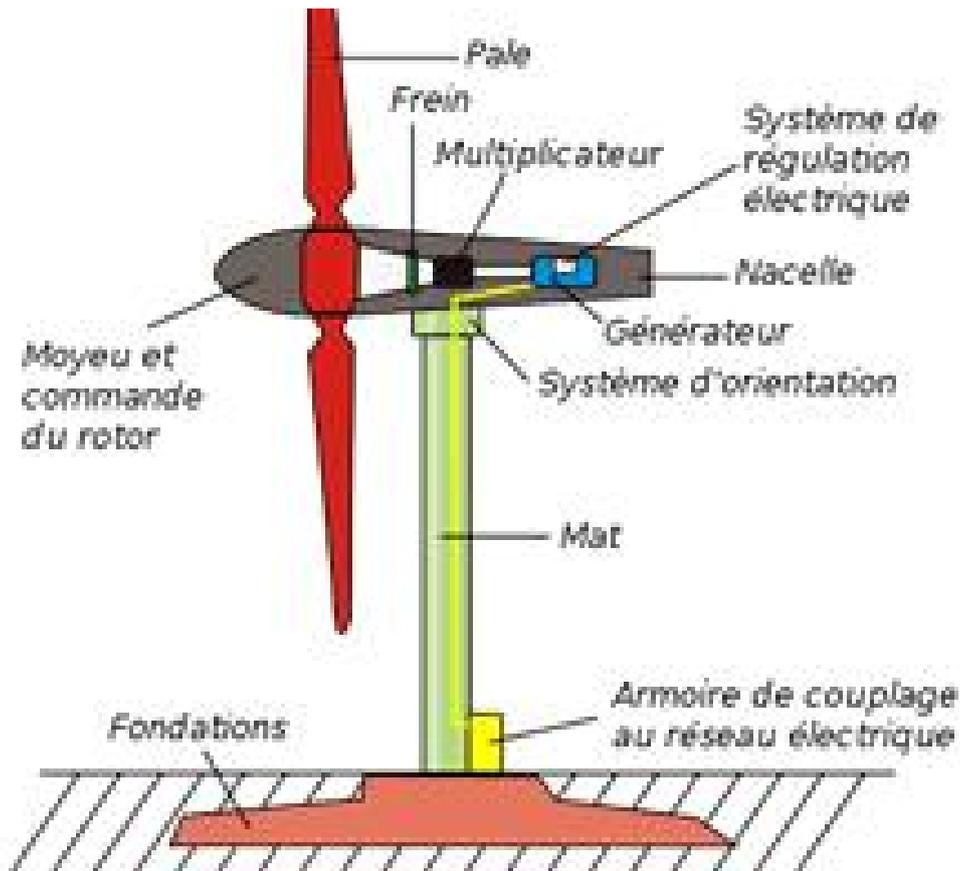


Figure 11 –Les compositions d'une éolienne

Composition d'une éolienne

1. 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 40 m à 120 m.

2. 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.

3. 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.

C) 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 CO2 de plus de 80 %.

La production, le traitement et le transport de la biomasse génèrent des émissions de CO2 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 thermo-chimiques.
- ✓ 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 appelée "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.

D) 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) :

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Ce transfert d'énergie est possible grâce à un générateur de type pompe à chaleur.

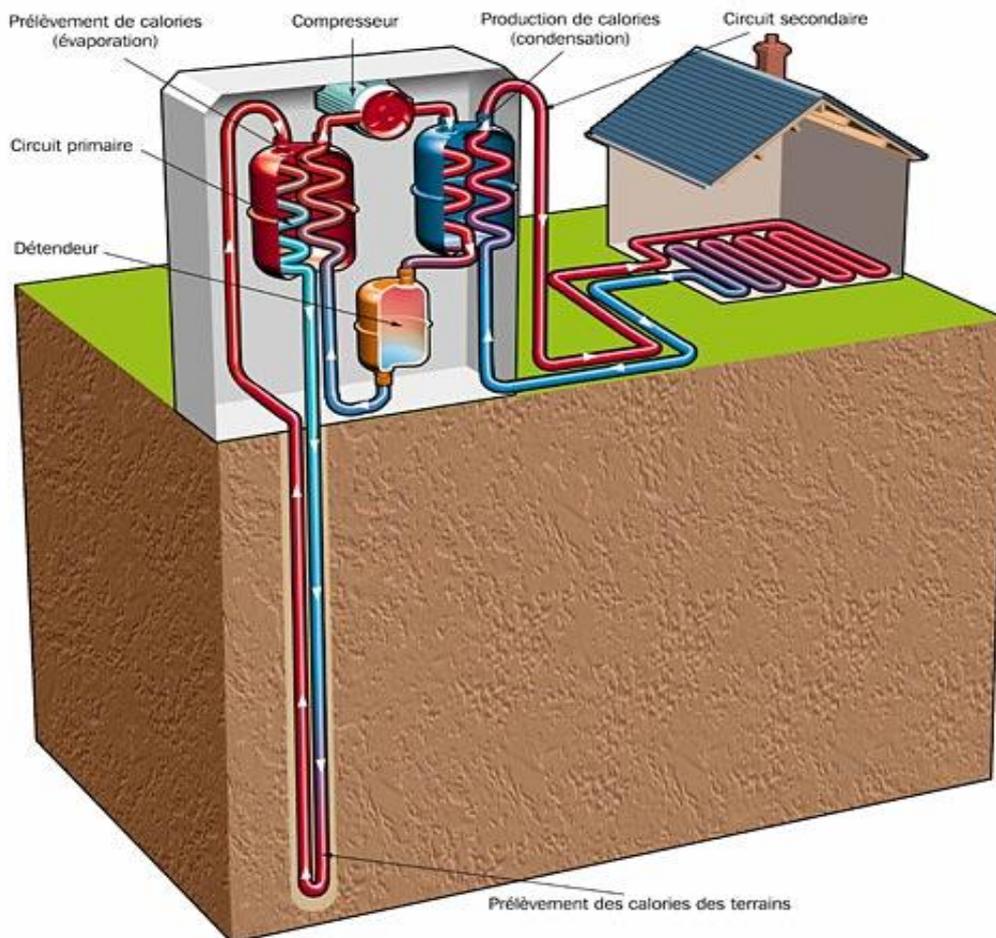


Figure 12- énergie géothermique

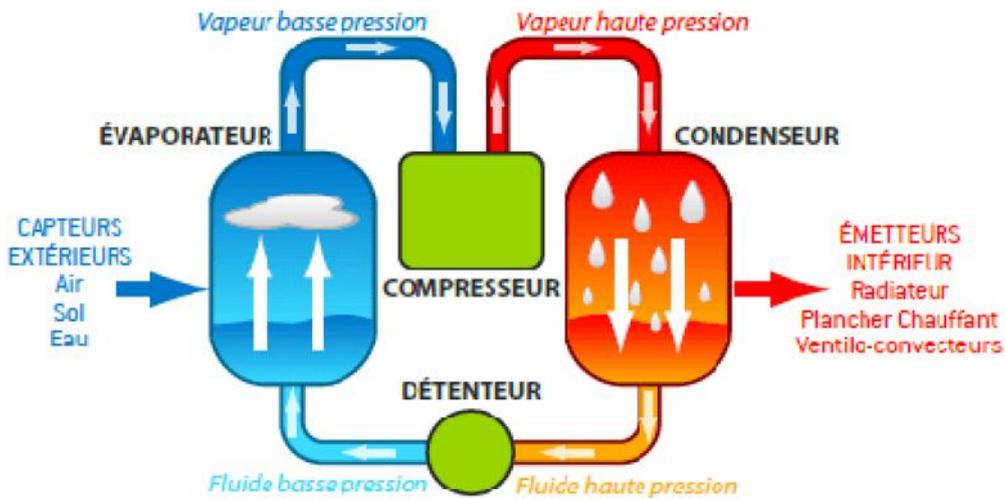


Figure 13 – pompe à chaleur

Comment ça marche une pompe à chaleur ?

Une pompe à chaleur est un système de chauffage thermodynamique basé sur un principe physique, le "changement d'état" et plus précisément l'évaporation et la condensation. Quand un liquide s'évapore pour devenir un gaz, il absorbe de l'énergie, quand il se condense pour revenir à l'état liquide, il dégage de l'énergie.

La température d'évaporation du fluide frigorigène étant toujours plus basse que la température du sol ou d'une nappe d'eau souterraine celui-ci absorbe les calories pour les restituer ensuite dans la phase de condensation. Ce transfert est possible grâce à un compresseur qui aspire, comprime et porte à haute température un fluide, ce compresseur permettra la circulation du gaz dans le circuit frigorigène.

Différents types de captage et source d'énergie

Capteur horizontal

La conductivité et l'inertie thermique du sol sont particulièrement intéressantes, stables tout au long de l'hiver de jour comme de nuit. Les minéraux et les matières organiques sont d'excellent conducteur thermique.

Il faudra disposer d'un terrain d'une surface de 1,5 à 2 fois la surface à chauffée, les tuyaux souples (PEHD ou PER) sont disposés en serpents enterrés de 80 cm à 1 mètre, de l'eau glycolée circule dans cet échangeur et permet le transfert d'énergie. La longueur totale des tubes du capteur peut être de plusieurs centaines de mètres, chaque spire est espacée de

plusieurs dizaines de centimètres. Cet écartement est important pour que le sol ne gèle pas et qu'il puisse se régénérer plus facilement.

Le sol doit être naturellement perméable pour faciliter les échanges thermiques, dans les sols argileux les capteurs doivent être posés sur un lit de sable.

Les capteurs peuvent être recouverts d'une pelouse, d'un jardin, mais aucun arbre à proximité car les racines pourraient abîmer les tubes.

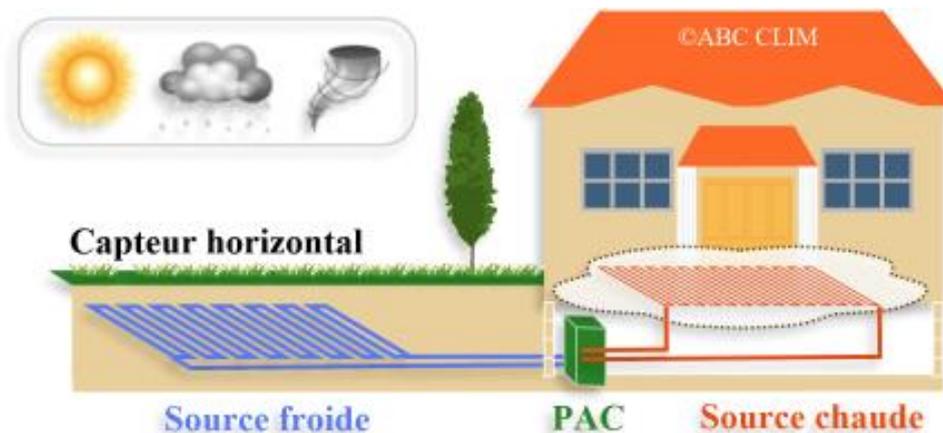


Figure 14 – Capteur horizontal

Capteur vertical, sonde géothermique

Les sondes verticales en tubes PHED sont installées dans un forage rempli de bétonite pour améliorer la conductivité, ce forage peut atteindre une profondeur allant jusqu'à 100 mètres. De l'eau glycolée circule à travers la sonde en circuit fermé dans des tubes de polyéthylène de 25 à 40 mm de diamètre. S'il y a plusieurs capteurs verticaux sur un même terrain, ils doivent être séparés par 10 mètres de distance.

Si ce dispositif occupe moins de place, il est plus onéreux qu'un captage horizontal et de plus il est soumis à autorisation (DRIRE). L'aide d'un géologue est fortement conseillé, il dispose du savoir et de certains logiciels pour optimiser la pose des capteurs.

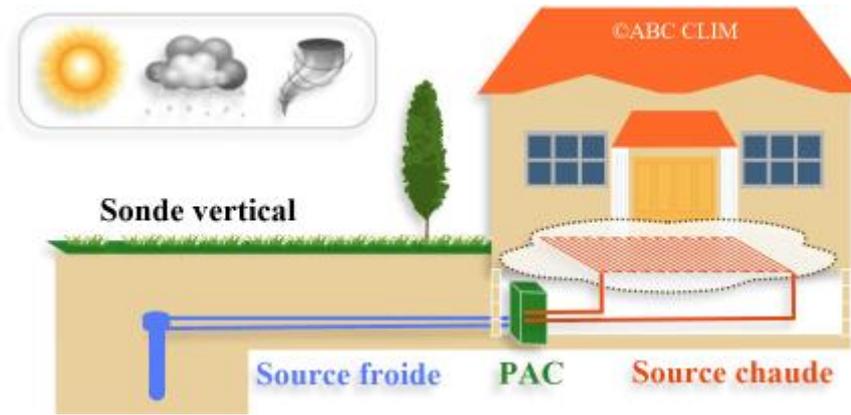


Figure 15 –Capteur vertical

Captage par nappe phréatique

Le captage peut être fait de deux manières soit on puise dans un puits unique puis on rejette cette eau dans une rivière ou un lac, soit par le principe des deux forages. Ce type de captage nécessite un forage pour récupérer les calories contenues dans l'eau, l'autre pour rejeter l'eau une fois l'énergie extraite. Compte tenu de la grande stabilité de la température de l'eau (7 et 12 °C), ce type de captage est très intéressant au point de vue énergétique. Les qualités physiques (dureté, acidité) de l'eau doivent être prises en compte, la source de captage doit aussi être disponible en quantité suffisante, faire une étude avant toute réalisation.

E) 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.

F) Les générateurs du futur : les piles à combustible (PAC)

Le principe de fonctionnement d'une PAC est simple. A partir d'une réaction chimique entre un carburant (hydrogène, gaz naturel, etc.) et un comburant (oxygène), de l'électricité est produite.

Selon le nombre d'éléments mis en série et/ou en parallèle, la puissance électrique est plus ou moins importante. Ce moyen de production, comme le photovoltaïque, nécessite un onduleur. Il existe trois technologies différentes qui permettent de produire de l'électricité. De plus, de la cogénération peut être réalisée avec les effluents de la pile.

Tableau 1 - Etat d'avancement des PAC

	PAFC	MCFC	SOFC
Température	200 ° C	650 ° C	1000 ° C
Rendement	36 - 45 %	50 - 60 %	50 - 55 %
Puissance	1-300 kW	10kW-100MW	1 kW-500MW
Etat d'avancement	Aboutie	pas encore mature	Encore expérimentale

La PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell) est la technologie mature (la seule à être au stade commercial). Elle semble néanmoins avoir trop d'inconvénients pour s'imposer (pureté du combustible, corrosion). La SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) n'est pas encore au point mais fait l'objet de recherches intensives, notamment aux Etats-Unis. La MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell) comporte de nombreux écueils techniques (corrosion) mais fait l'objet d'un développement soutenu au Japon (public et privé) car en matière de rendement, c'est la plus performante.

III- IMPACT DE LA PRODUCTION DECENTRALISEE SUR LE RESEAU DE DISTRIBUTION

Les 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 nœuds 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.

Une partie de ces GED à, de plus, des sources d'énergie primaire intermittente (éolienne, 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.

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

Enfin, la présence de GED en aval d'un poste source dont le transformateur est équipé d'un régulateur en charge régulé par compoundage perturbe son fonctionnement basé 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 [2,15,16].

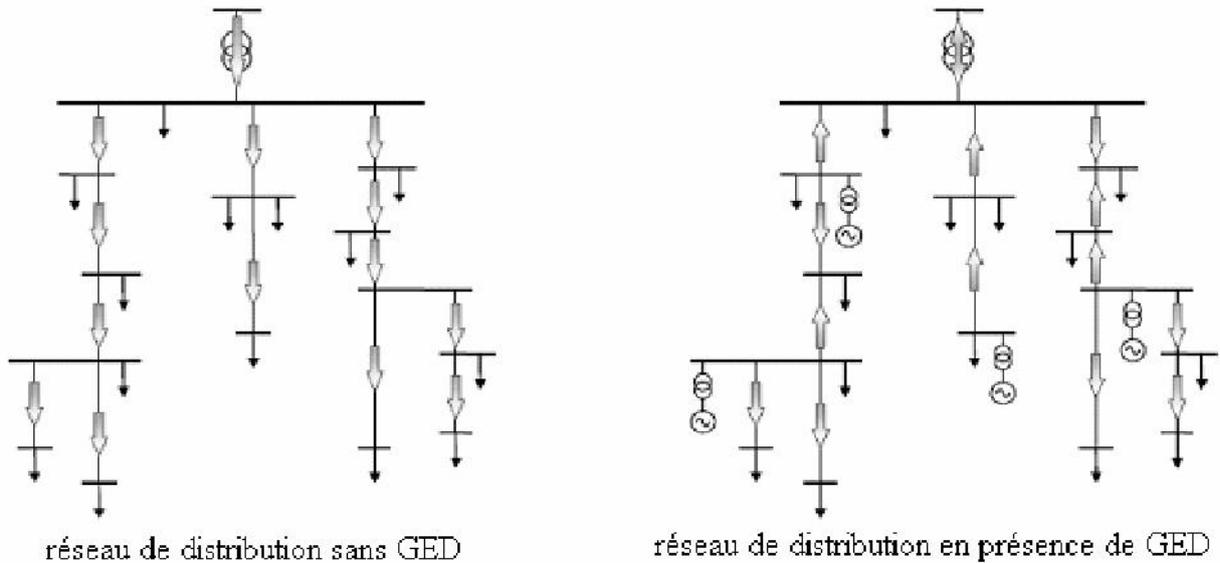


Figure 16 - Flux d'énergie sur un réseau de distribution en présence de GED.

III-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.

III-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 laquelle le système peut résister sans perte de stabilité). Ceci influencera directement la limite de la stabilité dynamique du système en considération.

III-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.

III-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.

III-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.

III-6- Impacts sur le plan de protection

Lorsqu'un défaut apparaît sur un départ MT, le distributeur doit, pour des raisons de sécurité, éliminer ce défaut en ouvrant le disjoncteur du départ. Assurant ainsi la mise hors tension du défaut. Dans le cas de défauts fugitifs sur un réseau aérien, une mise hors tension très courte (0.3s) est suffisante pour éliminer le défaut et permettre le succès d'un cycle de ré enclenchement rapide. La présence d'une installation de production ne doit pas perturber le fonctionnement du plan de protection du distributeur en sensibilité et en sélectivité lors d'un défaut sur le départ auquel elle est raccordée, l'installation de production doit se découpler pour ne pas maintenir sous tension le défaut : c'est le rôle de la protection de découplage. Cette protection "de découplage" devant supprimer la parallèle entre générateurs et réseau de distribution, lors d'un défaut ou d'une autre anomalie sur celui-ci. Le découplage doit répondre à des conditions strictes lorsqu'il est effectué des ré enclenchements automatiques rapides, ce qui est le cas le plus général des réseaux MT aériens.

III-6-1- Influence du producteur sur la sensibilité et la sélectivité du plan de protection

Lorsqu'un défaut se produit sur un départ, les groupes de production participent à l'alimentation du défaut. Cette injection de courant peut altérer la sélectivité et la sensibilité des protections existantes de deux manières :

- ✓ déclenchement intempestif d'un départ sain,
- ✓ aveuglement de la protection du départ en défaut.

III-6-2- Déclenchement intempestif d'un départ sain

La protection contre les défauts polyphasés utilisée par les gestionnaires des réseaux électriques est une protection ampère métrique à temps constant. Elle est réglée à 0.8 fois le courant de court-circuit biphasé calculé au point le plus éloigné du départ. Dans ces conditions, il faut s'assurer que le courant de court-circuit injecté par les groupes de production connectés sur un départ sain reste inférieur à ce réglage pour un défaut situé sur un départ adjacent. Dans le cas contraire on observera un déclenchement intempestif.

Considérons le schéma de la figure 7 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 (protection ampère métrique) comme c'est l'usage. En effet, tout défaut survenant sur un départ MT doit être éliminé par ouverture du disjoncteur de départ. Dans cet exemple extrêmement simple le disjoncteur de la ligne 1 peut débrancher intempestivement cette ligne en cas de défaut sur la ligne 2, car le courant du générateur lors de ce défaut peut être supérieur au seuil de protection. Ceci pour autant que la puissance des unités de production décentralisée soit importante et arrivera d'autant plus que le défaut soit proche du poste. La sélectivité de la protection est ainsi mise en défaut. Les seuils de protection doivent donc être revus pour que seule la ligne en défaut soit déconnecté.

*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. Ou bien requérir la mise en œuvre d'une **protection de courant directionnelle**, qui doit détecter si le défaut est en amont et non pas déclencher intempestivement.*

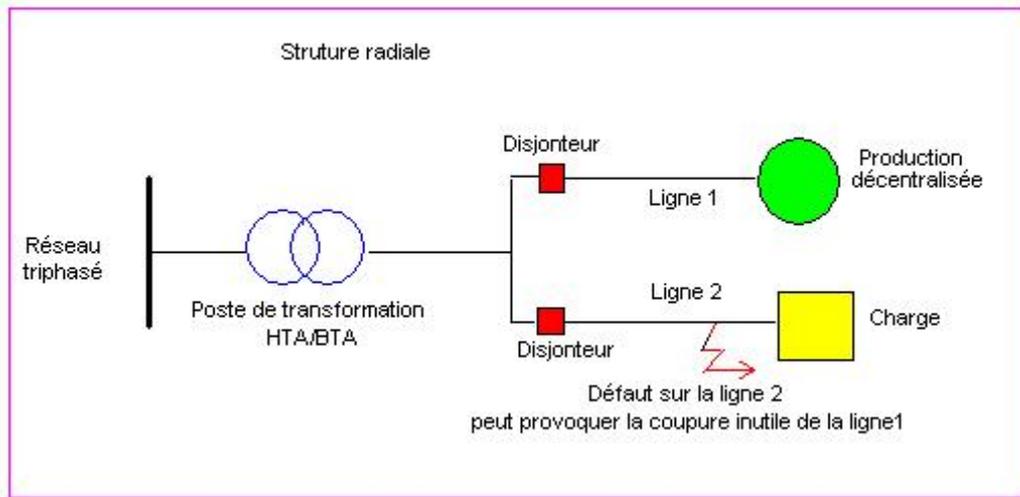


Figure 17- Influence de la production décentralisée sur la sélectivité de la protection des réseaux de distribution

III-6-3- Aveuglement de la protection du départ en défaut

Lorsque la production décentralisée est loin du poste source HT/MT et qu'un défaut apparaît sur une dérivation proche de la centrale, il peut arriver que l'impédance de la ligne entre le poste source et le défaut devienne très importante devant l'impédance entre la centrale et le défaut ; On observe alors une diminution du courant de défaut injecté au niveau du poste source par rapport au cas où la centrale n'est pas en fonctionnement (Figure 8). Il peut donc arriver que la protection au niveau du poste source ne détecte plus dans un premier temps le défaut

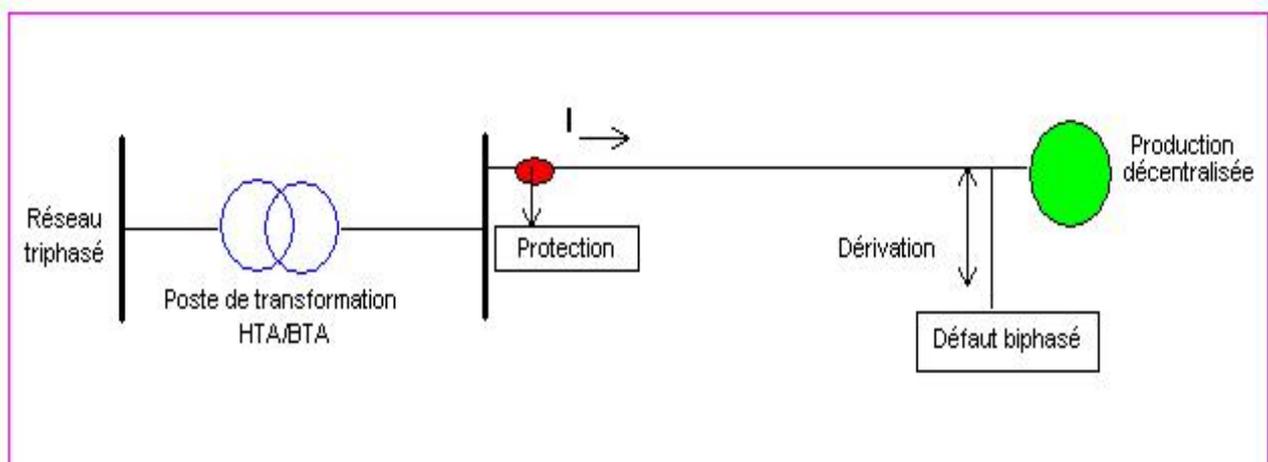


Figure18 - Aveuglement de la protection du départ en défaut

Dans ce cas il faudra attendre que la centrale se déconnecte par les relais minimums de tension entre phases de sa protection de découplage pour que la protection au poste source retrouve sa sensibilité. L'élimination des défauts est donc retardée de la temporisation du relais à minimum, de tension (1 à 1.5 s). Pour s'affranchir de ce problème, le raccordement du producteur sur un autre départ de caractéristique différente ou sur un départ dédié constitue la solution.

III-6-4- Protection de découplage

En cas de défaut sur la ligne à laquelle est raccordée une installation de production décentralisée, cette dernière doit impérativement se découpler automatiquement et rapidement pour ne pas maintenir le défaut sous tension. Cette fonction est assurée par la protection dite de découplage. Cette protection comporte généralement un ensemble de relais (relais homopolaire de tension, relais à saut de vecteur, etc.) et constitue un dispositif relativement complexe.

L'ouverture du disjoncteur au poste de départ provoque ainsi le découplage des unités de production décentralisée raccordées sur ce départ, ceci même en l'absence de défaut.

III-7- Intégration de la GED sur les réseaux de distribution

III-7-1- 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.

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.

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.

III-7-2 Étude de raccordement d'une installation

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 [9].

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.

IV- LES RESEAUX ELECTRIQUES DU FUTUR-LES SMART-GRIDS

IV-1- Description générale

Les smart grids sont une technologie qui permettrait d'affronter les changements actuels dans le paysage énergétique comme l'intégration des énergies renouvelables au réseau, la gestion de l'augmentation de la consommation ou encore le développement des voitures électriques. En effet ce réseau de distribution intelligent basé sur des technologies informatiques augmenterait l'efficacité de la gestion entre l'offre et la demande d'électricité. Ce nouvel équilibre engendrerait une optimisation du réseau de distribution mais aussi de la production. Les smart grids minimiseraient les pertes en ligne (comme produire inutilement de l'électricité lorsque l'offre est supérieure à la demande) ainsi que les problèmes causés par les énergies intermittentes (comme le solaire et l'éolien) sachant que l'énergie électrique est

difficilement stockable. Elles seraient également l'alternative au remplacement et la construction de nouvelles lignes électriques.

La notion de Smart grids combine deux idées : d'une part, rendre plus intelligents les réseaux électriques et, d'autre part, créer des mini-réseaux autonomes et dans lesquels on pourra associer aisément différentes sources d'énergie.

Le réseau intelligent possédera donc des caractéristiques différentes de celles du réseau électrique actuel qui nécessiteront des installations plus ou moins importantes. Son réseau ne sera pas linéaire mais bidirectionnel (l'ensemble des acteurs sera en interaction). Il se concentrera principalement sur le réseau de distribution car celui-ci n'est que faiblement doté de technologies de communication et gèrera l'équilibre du système électrique par la demande (consommation) et non par l'offre [10, 11, 12, 13,14].

IV-2- Compteurs intelligents

L'un des éléments principaux du dispositif des smart grids est le compteur intelligent. Il doit permettre de collecter et transmettre les données relatives à la consommation d'électricité du consommateur, mais également de recevoir des ordres à distance de la part du gestionnaire de réseau et, dans certains cas, de la production décentralisée d'électricité par le consommateur. Les conséquences de l'installation de tels compteurs sont doubles : d'une part, évidemment, mieux gérer à l'échelle nationale le rapport production/demande en temps réel, mais également d'un point de vue financier pour le consommateur, il permettra baisser la facture (grille tarifaire mieux adaptée au mode de consommation réel du client, messages d'alerte aux heures de pointe,...).

IV-3 Maison intelligente et smart grids

Les smart-grids consistent à communiquer tout au long du réseau, jusqu'à l'intérieur des bâtiments. Le but est de réduire la consommation globale, mais aussi de l'adapter à la production. On commence donc à parler de « maisons intelligentes », qui pourraient gérer leur consommation d'énergie elles-mêmes.

L'idée d'une maison intelligente est notamment de réduire les pics de consommation : La maison pourra directement gérer l'utilisation du chauffage, des appareils électroménagers, etc. afin de réduire la consommation à toute heure, et spécialement aux heures de pointe. Du point

de vue des énergies renouvelables, cela peut aussi permettre d'utiliser les appareils quand l'énergie est disponible (la maison devra donc être connectée au réseau pour suivre la production d'énergie en temps réel). Les appareils électroménagers pourraient par exemple se mettre en marche le midi, lorsque la production des panneaux solaires est la plus forte, et ainsi créer des pics de consommation correspondant aux pics de production, évitant le stockage.

La maison intelligente va même plus loin en s'intégrant directement au réseau : les voitures électriques, une fois branchées sur leur prise, ne resteraient pas inertes. Après avoir emmagasiné de l'énergie, elles pourraient la restituer lors des pics de consommation, en alimentant le réseau ou la maison, directement. Elles serviraient ainsi à soutenir le réseau et à aplatir les pics de consommation, se rechargeant lorsque l'énergie est disponible puis la rendant ensuite.

En plus de la gestion de la consommation, les maisons intelligentes peuvent aussi gérer leur propre production d'énergie. Cette production peut venir d'énergie renouvelables (solaire, éolien) mais aussi de la cogénération : il s'agit de produire avec le même appareil du chauffage et de l'électricité. La décentralisation de la production d'énergie sera gérable à grande échelle grâce aux compteurs communicants.

La maison intelligente s'appuiera donc sur un réseau domestique intelligent, reliant ensemble toutes les fonctions (chauffage, appareils électriques, éclairage, systèmes de sécurité, production d'énergie, voitures électriques, ...). Ce réseau devra être géré par un ordinateur, que l'on pourra paramétrer soi-même (température et heure d'allumage du chauffage, ouverture des volets, ...). Elle peut aussi posséder différents procédés ou gadgets connectés permettant de réduire la consommation d'énergie. On peut notamment citer la poignée intelligente : réglée grâce à une simple molette, elle éteint les lumières lorsque l'utilisateur sort, et rallume quand il rentre !

CONCLUSION

Depuis l'apparition des réseaux électriques ceux-ci ont toujours connu des évolutions. Ces évolutions avaient pour but majeur d'améliorer le fonctionnement des réseaux.

L'insertion à grande échelle de la production décentralisée dans les années à venir semble énergétiquement et économiquement intéressante. Cependant, sur le plan de l'exploitation des réseaux électriques, elle apporte un facteur de vulnérabilité supplémentaire, notamment dans les situations critiques.

Nous avons vu, au cours de ce document, différents impacts de la production décentralisée sur le réseau électrique de distribution. 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.

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] G. Rami « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution» Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [3] C. 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] O. Richardot, « Réglage coordonné de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisée », PhD. dissertation, INP Grenoble, 2006.
- [5] K. Foued «Etude des variations rapides de tension pour le raccordement d'une production décentralisée dans un réseau MT» mémoire de magistère, Constantine.
- [6] «_Arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricité en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie électrique », Journal Officiel de la République Française, Avril 2008.
- [7] Abdenour ABDELLI « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » Thèse de doctorat DE L'INPT 2007.
- [8] H. G. Arantzamendi « étude de structures d'intégration des systèmes de génération décentralisée : application aux micro- réseaux » Thèse de doctorat INPG, 2006.
- [9] UEM « Liste des études à mener pour le raccordement d'un utilisateur HTA aux réseaux publics de distribution » Référentiel technique HTA et BT 2005.
- [10] Boris B. : « Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du Futur » Sciences de l'ingénieur [physiques]. Université de Grenoble, 2010. Français.
- [11] H. Farhangi, «The path of the smart grid», IEEE Power & Energy Magazine, vol. 8, no. 1, pp. 18_28, January/February 2010.
- [12] G. Andersson, P. Donalek, R. Farmer, N. Hatziargyriou, I. Kamwa, P. Kundur, N. Martins, J. Paserba, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, R. Schulz, A. Stankovic, C. Taylor, and V. Vittal, «Causes of the 2003 major grid blackouts in north america and europe, and recommended means to improve system dynamic performance » IEEE Transactions on Power Systems, vol. 20, no. 4, pp. 1922_1928, November 2005.
- [13] F. Katiraei and M. R. Irvani, «Power management strategies for a microgrid with multiple distributed generation units», IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 4, pp. 1821_1831, November 2006.
- [14] C. E. Root, « The future beckons» IEEE Power & Energy Magazine, vol. 4, no. 1, pp. 24_31, January/February 2006.
- [15] M. Eremia, J. Trecat, A. Germond, « Réseaux électriques – Aspects actuels », L'Editeur Technique, Bucarest, ISBN : 973-31-1526-6, 2000.
- [16] O. Richardot, « Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée », Thèse doctorat en Génie Electrique, INPG 2006.
- [17] DA-Engineering, le site personnel du Docteur Ingénieur Dhaker Abbas :www.da-engineering.com.

Annexe A
Energie Eolienne

Une éolienne a les caractéristiques suivantes [17] :

- Diamètre de rotor : **100 m** avec **3 pales**,
 - Coefficient d'efficacité **Cp = 0,44**.
- 1) Calculer la puissance captée par l'éolienne pour une vitesse de vent de **7 m/s** puis pour une vitesse de vent de **10 m/s**.
La masse volumique de l'air = **1,225kg/m³**.
- 2) Conclusion. Quels paramètres faut-il prendre en compte lors du choix et de l'installation d'une éolienne ?

Solution :

1) $P_{\text{captée}} = 0,5 \cdot C_p \cdot A \cdot \rho \cdot V^3$ [W]

A 7m/s: $P_{\text{captée}} = 0,5 \cdot 0,44 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 1,225 \cdot 7^3 = 726 \text{ KW}$

A 10m/s : $P_{\text{captée}} = 0,5 \cdot 0,44 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 1,225 \cdot 10^3 = 2116,65 \text{ KW}$

- 2) Conclusion : La vitesse instantanée intervient au cube dans la puissance générée. Elle est le facteur le plus influent.

Les paramètres qu'il faut prendre en compte lors du choix et de l'installation d'une éolienne sont :

- la vitesse instantanée qui intervient au cube dans la puissance générée ;
- la densité de l'air instantanée qui intervient elle aussi, mais au facteur 1 ;
- la surface du rotor qui intervient, de même, au facteur 1.

Annexe B
Panneau Solaire Photovoltaïque

Les caractéristiques d'un module photovoltaïque sont données dans le tableau ci-dessous lorsque le module reçoit une puissance rayonnante de **1000 W** sur **1 m²** de surface de module [17].

Tableau 1 : caractéristiques électriques (à 1000 W.m⁻²)

T cellules	25° C	50° C
P max (W)	36	32.5
U à P max (V)	16.3	14.4
I à 10V (A)	2.29	2.28
I court-circuit * (A)	2.45	2.50
U circuit ouvert (V)	20.3	18.4

*l'intensité de court-circuit correspond à l'intensité du courant lorsque les deux bornes de la cellule photovoltaïque sont reliées par un fil conducteur.

Rendement = (puissance fournie par le module / puissance reçue par le module) .100.

- 1) Donner l'allure de la caractéristique tension-intensité (tension en abscisse et intensité en ordonnée) de ce module photovoltaïque, à **50°C**, pour une puissance rayonnante reçue de 1000 W.m⁻². On placera :
 - a) le point de fonctionnement A correspondant à l'intensité de court-circuit ;
 - b) le point de fonctionnement B correspondant à un circuit ouvert ;
 - c) le point de fonctionnement C correspondant à la puissance électrique maximale disponible.

- 2) Ce module reçoit, à **50°C**, une puissance rayonnante surfacique de 1000 W.m⁻². La tension à ses bornes, lorsqu'il fonctionne est égale à **10V**.
 - a) D'après les données, quelle est, alors, la valeur de l'intensité **I** du courant ?
 - b) Quelle est la puissance électrique fournie ?
 - c) La surface du module est égale à **0,185 m²**. Calculer le rendement énergétique du module.

- 3) Que peut-on conclure de l'influence d'une augmentation de la température sur les performances d'un panneau solaire photovoltaïque ? En est-il de même pour un panneau solaire thermique ?
- 4) Ce panneau est installé en site isolé dans un système autonome. Faites le schéma synoptique de l'installation.
- 5) Comment maintenir le panneau en fonctionnement optimal (maximum de puissance) ? Citer deux méthodes.

Solution :

1)

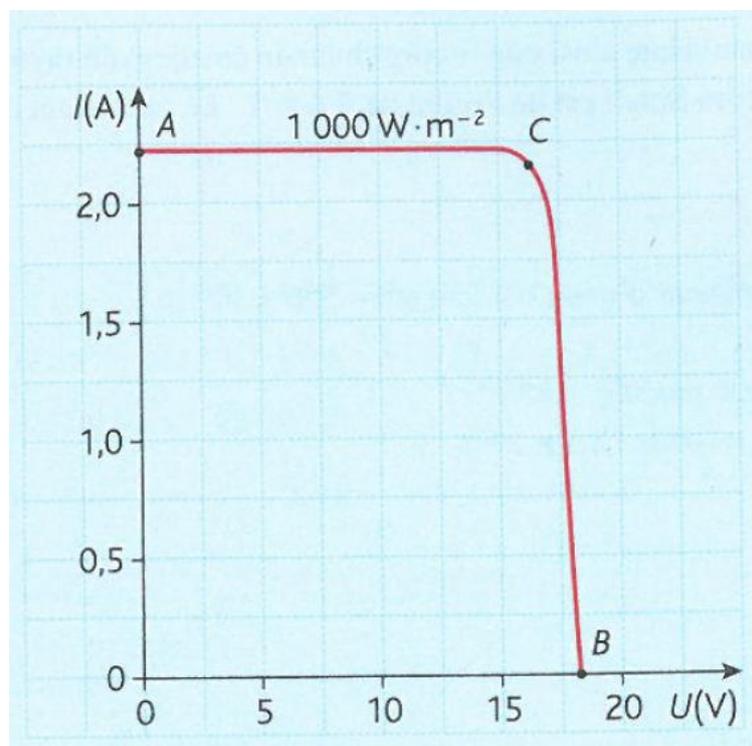


Figure 1-Allure de la caractéristique tension-intensité du module photovoltaïque

2)

- a) $I=2,28$ A.
- b) $P=U.I=22,8$ W.
- c) Rendement: $22,8/185 = 12,3\%$.

3) A 25°C les performances sont meilleures. Une augmentation de la température diminue donc les performances d'un panneau solaire photovoltaïque. C'est le contraire pour un panneau solaire thermique.

4)

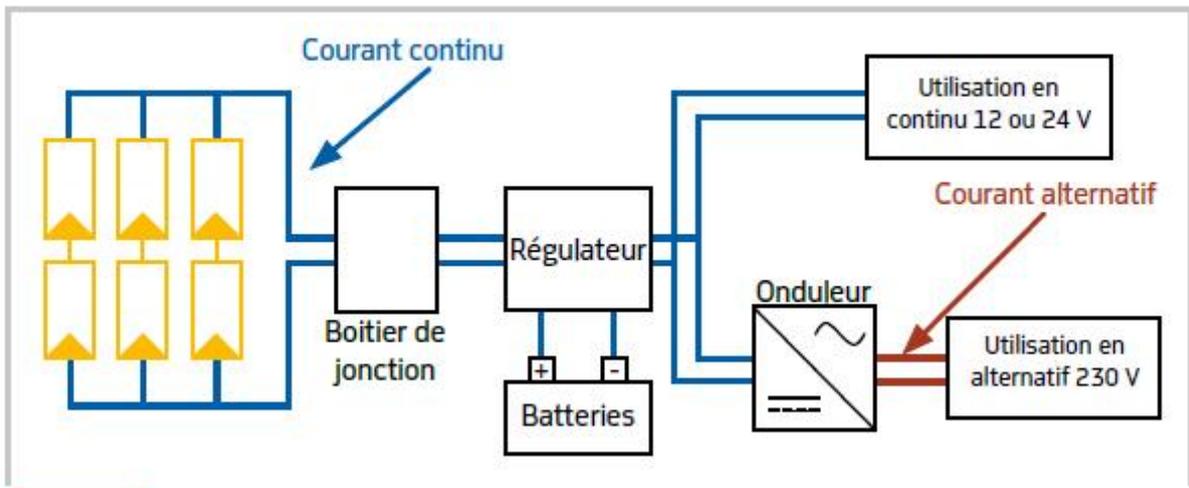


Figure 2-Synoptique d'une installation photovoltaïque autonome

- 5) Un Maximum Power Point Tracking (abrégé MPPT, litt. dispositif de poursuite du point de puissance maximale), régulateur MPP ou un tracker MPP est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale du panneau photovoltaïque.
- Méthodes MPPT : Perturb and Observ, Incremental Conductance, Parasitic Capacitance, Constant Voltage, Anti-islanding...

Annexe C- Comparaison d'une Centrale Photovoltaïque (PV) de 5 MW avec une Centrale Electrique Classique (au charbon) de 5 MW

Annexe C

Comparaison d'une Centrale Photovoltaïque (PV) de 5 MW avec une Centrale Electrique Classique (au charbon) de 5 MW

Une centrale photovoltaïque est constituée de panneaux solaires, d'un régulateur de puissance maximale (MPT), d'un hacheur élévateur/abaisseur, d'un onduleur triphasé et d'un transformateur triphasé connecté en étoile-triangle (Y-) à une charge de puissance [17] :

$$P_{\text{out-transformateur}} = 5\text{MW}.$$

Note : 5 MW peuvent fournir de l'électricité à 1800 résidences.

Performance de l'installation photovoltaïque de 5 MW :

- (a) Dessiner un schéma de principe des composants mentionnés ci-dessus.
- (b) si chacun des composants, régulateur de puissance maximale (MPT), hacheur élévateur/abaisseur, onduleur triphasé et transformateur, a un rendement $\eta = 90\%$, quelle est la puissance maximale requise du générateur solaire ($P_{\text{solar-array-max}}$) pour une puissance à la sortie du transformateur $P_{\text{out-transformateur}} = 5\text{MW}$.
- (c) Sachant que le rendement des cellules solaires est $\eta_c = 15\%$, quelle est la puissance solaire maximale ($P_{Q_s\text{-max}}$) nécessaire ?
- (d) La centrale photovoltaïque est constituée de 43000 panneaux solaires chacun ayant une surface de $(0,8 \times 1,6) \text{ m}^2$. Quelle est la surface totale de l'ensemble des panneaux et quelle est l'irradiation solaire maximale nécessaire (Q_s , mesurée en KW/m^2) dans le lieu de cette installation photovoltaïque ?
- (e) Quelle est la période de retour sur investissement (en années) si :
 - ✓ 1kW installé coûte \$4000,
 - ✓ le prix moyen du KWh produit durant les 15 années futures est de \$0,2 ?

A noter que les coûts de carburant sont nuls et les coûts d'exploitation sont négligeables ; vous pouvez aussi assumer un fonctionnement de 6h par jour à 80% de la capacité de puissance $(0,8 \times 5\text{MW}) = 4\text{MW}$.

Performance de l'installation conventionnelle (au charbon) de 5 MW :

Annexe C- Comparaison d'une Centrale Photovoltaïque (PV) de 5 MW avec une Centrale Electrique Classique (au charbon) de 5 MW

- (f) 1 kW installé dans une centrale conventionnelle au charbon coûte \$2000. Quelle est la période de retour sur investissement en années si le KWh produit demande un coût de fuel et d'exploitation de \$0,075 et si le prix moyen de vente du KWh est \$0,20/KWh ? Vous pouvez supposer 24h de fonctionnement par jour à 80% de la capacité de la centrale (0,8x5MW) = 4MW.

Solution :

a)

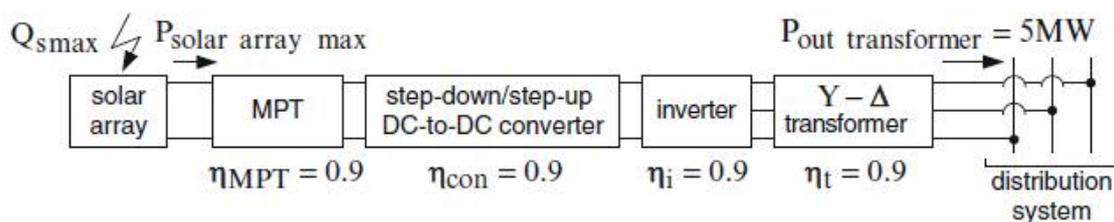


Figure 3- Schéma synoptique d'une centrale PV de 5 MW

b) Puissance maximale requise du générateur solaire :

$$P_{\text{solar-array-max}} = P_{\text{out-transformateur}} / (\eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_{\text{con}} \cdot \eta_{\text{MPT}}) = 5\text{MW} / (0,9)^2$$

$$= 7,62 \text{ MW}$$

c) Puissance solaire maximale ($P_{Q_s\text{-max}}$) nécessaire :

$$P_{Q_s\text{-max}} = P_{\text{solar-array-max}} / \eta_{\text{cell}} = 7,62 \text{ MW} / 0,15 = 50,81 \text{ MW}$$

d) Surface totale de l'ensemble des panneaux « $\text{area}_{\text{totalarray}}$ » et l'irradiation solaire maximale nécessaire (Q_s mesurée en kW/m^2) :

$$\text{area}_{\text{totalarray}} = 43000 \cdot 0,8 \cdot 1,6 = 55,04 \cdot 10^3 \text{ m}^2$$

$$Q_{s\text{max}} = P_{Q_s\text{-max}} / \text{area}_{\text{totalarray}} = 50,81 \cdot 10^3 \text{ kW} / 55,04 \cdot 10^3 \text{ m}^2$$

$$= 0,92 \text{ kW/m}^2$$

e) Période de retour sur investissement (en années) :

1kW installé coûte \$4000, le prix moyen du KWh produit durant les 15 années futures est de \$0,2, cela fait \$20 M.

A 80% de sa capacité => 4MW, les revenus par an sont :

Annexe C- Comparaison d'une Centrale Photovoltaïque (PV) de 5 MW avec une Centrale Electrique Classique (au charbon) de 5 MW

$$4000 \cdot 0,2 \cdot 365 \cdot 6 \cdot y = \$1,752 \text{ M.y}$$

Or la période de retour sur investissement est :

$$y = 20/1,752 = 11,42 \text{ ans, en négligeant les taxes, réductions.}$$

- f) Période de retour sur investissement en années si le KWh produit demande un coût de fuel et d'exploitation de \$0,075 et si le prix moyen de vente du KWh est \$0,20/KWh :

1 kW installé dans une centrale conventionnelle au charbon coûte \$2000

Il y a le coût du fuel et des opérations :

$$\text{Coût} = 0,075 \cdot 4000 \cdot 365 \cdot 24 \cdot y = \$2,628 \text{ M.y}$$

Les revenus sont basés sur le prix moyen de vente du KWh (\$0.20/KWh).

A 80% de sa capacité => 4MW, les revenus par an sont :

$$4000 \cdot 0,20 \cdot 365 \cdot 24 \cdot y = \$7,01 \text{ M.y}$$

Or la période de retour sur investissement est égale à :

$$y = 10 / (7,01 - 2,628) = 2,28 \text{ ans, négligeant toutes taxes carbone ou réductions.}$$

A noter que cette période de retour sur investissement aurait augmentée si nous avions pris en compte la taxe carbone. D'un autre côté, les panneaux solaires ne génèrent pas 4MW sur une période de 6h à cause de la variation de la quantité du rayonnement solaire.