



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
Université Ahmed Draïa Adrar  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département des Sciences et Technologies



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER EN ELECTROTECHNIQUE  
OPTION: RESEAUX ELECTRIQUE

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Electrotechnique

**Spécialité :** Réseaux Electriques

**Intitulé:**

# Etude d'une centrale photovoltaïque alimenté un réseau intelligent

**Soutenu publiquement : le 21/06/2018**

**Présenté par :**

- HARFAK Bachir
- BOUIDIA Mohammed

**Devant le jury :**

Président : Mr	CHABANI Boumediene	M.A.B	Univ. Adrar
Promoteur : Mr	DEHBI Hacene	M.A.B	Univ. Adrar
Examineur :Dr	BARBAOUI Brahim	M.R.A	U.R.ERR-MS Adrar

**Année Universitaire : 2017/2018**



## Remerciements

Nous remercions Allah tout puissant qui nous a donné la force et la volonté pour pouvoir finir ce mémoire de master. Nous tenons tout d'abord à exprimer notre gratitude à notre encadreur  
Pr, **DAHBI Hacène** maître assistant à l'université d'Adrar. Pour la confiance qu'il nous a accordée, ses encouragements, et ses précieux conseils, et pour ces efforts avec nous dans ce mémoire. Nous remercions tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à  
notre travail

**Mr .BABRBAOUI Brahim et Mr. CHABANI Boumediene et aussi Mr. HARROUZE Abdelkader**

Nous les remercions tous les :

Enseignants qui, par leur enseignement, leur encouragement et leur Aide, ont contribué à notre formation.

Nous désirons également remercier très chaleureusement Tous les  
Professeurs.

En fin, nous tenons également à remercier tous ceux qui ont participé de Près ou de loin à la réalisation de notre modeste travail.

***HARFAK Bachir et BOUIDIA Mohammed***

A decorative scroll with a cream-colored background and a green border. The scroll is adorned with several vibrant red roses and green leaves. Small, colorful confetti dots are scattered throughout the background. The scroll is unrolled, showing the text in the center.

## Dédicace1

**Je dédie ce modeste travail Particulièrement à ma femme**  
Pour tous les sacrifices qu'elle a fait pour m'encourager de terminer mes études  
De MASTER

A ma belle-mère, mes chères sœurs, belles sœurs, frères et à ma petite famille, et  
surtouts mes enfants  
hacene, houcine, nafissa et mohammed que Dieu vous garde.

A mon encadreur Mr : DAHBI Hacene pour son  
Amabilité et sa disponibilité.

A mon frère, **BOUIDIA Mohammed,**

A mon chef de service Mr **BERKANI Abdelaziz**

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans mon  
travail au poste de Timimoun, ainsi qu'à tous mes amis et  
collègues de service de transport d'électricité GRTE/Adrar

***HARFAK Bachir***

***Adrar juin 2018***

A decorative scroll with a cream-colored background and a green border. The scroll is adorned with several vibrant red roses and green leaves, along with small, colorful confetti dots. The scroll is unrolled, showing the text in the center.

## Dédicace2

Je dédie ce modeste travail Particulièrement à mon père et ma femme pour tous les sacrifices qu'ils ont faits pour moi.

A mes frère, à mes chères sœurs et à ma petite famille, et mes enfants, que Dieu vous garde.

A mon encadreur Mr : DAHBI Hacene pour son amabilité et sa disponibilité.

A mon frère, **HARFAK Bachir**

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans mon travail ainsi qu'à tous mes amis de travail

***BOUIDIA Mohammed***

***Adrar juin 2018***

# Sommer

Remerciement

Décédas

Acronymes

Introduction générale .....01

## ***CHAPITRE 1 : Potentiel énergétique en Algérie*** I.1

Introduction : 5

I.2 Etat des lieux du mix Energétique ..... 6

I.3 Les énergies renouvelables en pourcentage : ..... 7

I.4 Le potentiel des Energies Renouvelables en Algérie : ..... 8

I.4.1 Le potentiel solaire : ..... 10

I.4.2 Le potentiel éolien : ..... 11

I.4.3 Potentiel géothermique : ..... 12

I.4.4 Potentiel de biomasse : ..... 12

I.4.5 Le potentiel hydraulique : ..... 13

I.5 Le secteur de l'électricité : ..... 13

I.6 L'Energie électrique en Algérie : ..... 14

I.6.1 L'électricité photovoltaïque : ..... 15

I.7 Programme de développement des énergies renouvelables : ..... 16

I.7.1 Consistance du programme de développement des énergies renouvelables : ..... 17

I.8 politique nationale de développement des énergies renouvelables : ..... 18

I.9 Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables : ..... 20

I.10 Production de l'électricité renouvelable : ..... 20

I.11 En termes de Transport d'électricité ..... 21

I.12 En termes de Réseaux de Distribution de l'électricité et du gaz ..... 22

I.13 Représentation des productions d'électricité par producteur année 2016 ..... 24

## ***chapitre II: Réseau De Transport Et De Distribution D'électricité.....***

II.1 introduction ..... 26

II.3 Description des réseaux électriques ..... 29

II.3.1. Le réseaux de Transport THT ..... 29

II.3.2 Le réseaux de répartition HTB ..... 29

II.3.3 Le réseaux de Distribution HTA ..... 29

II.3.4 Le réseaux de livraison BTA .....	30
II.4 Constitution des réseaux électrique .....	30
II.4.1 Les centrales électriques .....	30
II.4.1.1 Les centrales Solaire ou photovoltaïques : .....	31
II.4.1.2 Les centrales éoliennes : .....	31
II.4.2 les postes électrique .....	31
II.4.2.1 Différents types de postes électriques .....	31
II.4.2.2 les fonctions principales des postes électriques.....	31
II.4.3 Les lignes électrique .....	32
II.4.3.1 Lignes de distribution BTA .....	32
II.4.3.2 Lignes de distribution HTA .....	32
II.4.3.3 Lignes de transport HTB .....	32
II.4.3.4 Lignes de transport THT.....	32
II.4.4 Différentes lignesélectriques.....	32
II.4.4.1 ligne saériennes.....	32
II.4.4.2 Les lignes souterraines.....	32
II.5 Vision résumé sur réseau d'Adrar .....	34
II.5.1 Introduction : .....	34
II.5.2 Source D'alimentation .....	34
II.5.3 Centrales de Production :.....	35
II.5.4 Postes 220/30 KV : .....	35
II.5.5 Distribution .....	36
II.5.6- Schéma Synoptique du réseau 220KV [10]      36	
<b>CHAPITER III:Réseauintelligente.....</b>	<b>39</b>
III.1 Synthèse.....	40
III.2 Généralités .....	41
III.3 Réalité aujourd'hui.....	44
III.3.1 Situation actuelle en Suisse .....	45
III.3.1.1.Avantages et inconvénients des smart meters et des smart grids .....	46
III.3.1.2Premières expériences menées dans le cadre de projets pilotes .....	48
III.3.2Situation en Europe .....	49
III.4 Evolutions futures .....	51
III.4.2 Evolution d'autres technologies .....	53
III.4.3 Autres facteurs de pérennité .....	54
<i>CHAPITERVI Simulation D'un Système Photovoltaïque Raccorde Au Réseaux.....</i>	<i>56</i>
VI .1 introduction .....	57
VI.2 INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE : .....	57
VI.2.1 Qu'est-ce que les installations PV FOURNISSENT ? .....	57

VI.2.2 Description des installations PV .....	59
VI.3.1 Alimentations électriques faibles puissances.....	60
VI.3.2 Installations électriques photovoltaïques autonomes :.....	60
VI.3.3 Installations électriques photovoltaïques raccordées au réseau.....	61
VI.4: Système raccordé au réseau .....	63
VI.4.1 : Principe de raccordement .....	63
VI.4.2 : composant d'un système photovoltaïque.....	64
VI.4.2.1 : Modules .....	64
VI.2.2 LE PANNEAU PHOTOVOLTAIQUE :.....	68
VI.4.2.3 Les Batteries : .....	69
VI.4.2.4 Système de régulation :.....	72
VI.4.2.5 Système de conversion :.....	73
VI.5 La protection électrique des installations PV .....	78
VI.5.1 Les Protections coté AC :.....	78
VI.5.1.1 protection de découplage : .....	78
VI.5.2 Protection contre les surintensités :.....	78
VI.5.2.1 Courants de surcharge :.....	79
VI.5.2.2 Courant de courts circuits :.....	79
VI.5.3 Dispositifs de sectionnement et de coupure :.....	79
VI.6.4 Mise à la terre :.....	80
VI.6.5 Protection contre les surtensions.....	80
VI.6.6 Protection différentielle : .....	81
III.5 Modalisation le système PV raccordé au réseau .....	81
VI.7.1 modalisation et simulation les composent de système .....	81
VI.7.1.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque .....	81
VI.7.1.1 Simulation de composent.....	83
VI.7.1.2 Modélisation de la commande MLI .....	86
VI.8 Conclusion .....	89
Conclusion.....	91
VI.10 Introduction.....	92
VI.11 grille Micro.....	92
VI.11.1 Charger et utilitaire de modélisation Grille .....	94
VI.11.2 Transmission Modélisation ligne.....	94
VI.11.3 Modélisation de la production distribuée .....	95
VI.11.4 Batterie .....	97
VI.13 Description.....	99
VI.14 Résultats de la simulation: .....	100
VI.15 Résultats Analyser .....	102
VI.16 Conclusion .....	103
conclusion general .....	104





## Liste de figure

Figure I.1 : Accès a l'électricité en %.....	06
Figure I. 2 : la part des énergies renouvelable.....	07
Figure I.3 : Structure de la production électrique d'origine renouvelable dans le monde.....	08
Figure I.4 : Prévisions de développement en énergies renouvelables.....	21
Figure I. 5 : Evolution des longueurs du réseau de transport de l'électricité.....	22
Figure I.6 : Evolution du nombre de postes électriques.....	23
Figure I.7 représentations de production par producteur .....	24
Figure I.8 représentation de production par filière .....	25
Figure.II-1 : Schéma d'un réseau électrique.....	26
Figure II-2 : Organisation des différents niveaux de tension du système électrique .....	27
Figure II-3 : Architecture d'un réseau électrique moderne.....	28
Figure.II.4 - Types de raccordement de postes MT.....	33
Figure II- 5 :Schéma Synoptique du réseau 220KV.....	38
Figure III.1. Représentation schématique d'un smart grid. Source : .....	41
Figure III.2. Investissements dans des projets smart grid en Europe. ....	50
Figure VI-1 – Schéma de principe d'installation PV.....	59
FigureVI-2 : système photovoltaïques autonomes .....	61
Figure VI-3 : Réglage de système photovoltaïques .....	61
Figure VI- 4: Raccordement en un seul point au réseau public de distribution .....	62
Figure VI-5: Raccordement en deux points au réseau public de distribution .....	62
Figure VI-5: Raccordement en deux points au réseau public de distribution.....	62
FigureVI-6: module Photovoltaïques .....	65
Figure VI-7: Caractéristique courant tension d'un module PV.....	67
Figure VI-8 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série .....	67
Figure VI-10: Construction d'une batterie monobloc.....	71
Figure VI-11 : Configurations des onduleurs connectés au réseau .....	76
Figure VI-12: diagramme de La protection électrique des installations PV .....	78

Figure VI.27: Modes Micro grille.....	92
Figure VI.28: modèle de réseau électrique 200kV dans Matlab / Simulink.....	94
Figure VI.29: Trois modèles de charge de phase dans Matlab.....	94
Figure VI.30: Trois modèles section de phase PI ligne dans Matlab / Simulink.....	94
Figure VI.31: circuit équivalent de cellules photovoltaïques.....	95
Figure VI.32: The Thevenin Equivalent Circuit du modèle de batterie.....	97
Figure VI.33: Le circuit équivalent de la batterie rechargeable.....	97
Figure VI.34: Modèle simplifié d'un petit Scaled Micro-Grid.....	98
Figure VI.35: Pv simulation de puissance.....	100
Figure VI.36: simulation de puissance secondaire.....	100
Figure VI.37: Puissance de simulation de batterie.....	100
Figure VI.38: puissance de la batterie simulation SGG.....	101
Figure VI.39 puissance de simulation de batterie AH.....	101
Figure VI.40: tension et de simulation.....	101
Figure VI.41: simulation en cours.....	102
Figure VI.42: simulation de charge électrique.....	102

### ***Liste de tableau***

Tableau I. 1: le potentiel solaire en Algérie.....	10
Tableau I.2 : Evolution de la population, puissance installée et production d'énergie en Algérie...15	15
Tableaux I.3 programme de développement des énergies renouvelables .....	18
Tableau I.4 : prévision de réalisation des 4 sociétés de distribution.....	23
Tableau II-2 :consistances du réseau d'Adrar .....	37

## ACRONYMES :

AIE	Agence International de l'Energie
APRUE	Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (Algérie)
BOOT	Build, Own, Operate and Transfer BT Basse Tension
BTP	Bâtiment et Travaux Publique
BT	basse tension
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables
CREG	Commission de Régulation et de l'Electricité et du Gaz
CSP	ConcentratedSolar Power
ER	Energie Renouvelable
EREE	Energie Renouvelable et Efficacité Energétique
FNME	Fonds de l'Environnement Mondial
FNME	Fonds National de Maîtrise de l'Energie (Algérie)
GES	Gaz à Effet de Serre
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GPL	Gaz de Pétrole Liquéfié
IFI	International Financial Institution
MENA	Middle East and North Africa
MT	Moyenne Tension
NEA	New EnergyAlgeria
PIB	Produit Intérieur Brut
PNME	Programme National de Maîtrise de l'Energie (Algérie)
PV	Photovoltaïque
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
UE	Union Européenne

### **Unités physiques :**

GW	Gigawatt
GWh	Gigawatt-Heuer
Ktep	kilo tonnes équivalent pétrole
kWc	Kilo Watt crête
KWh	Kilowatt-heure
m <sup>2</sup>	Mètre carré
Mm <sup>3</sup>	Millions de mètres cubes
Mtep	Million tonnes équivalent pétrole
MW	MégaWatt
T	Tonnes
Tep	Tonnes équivalent pétrole
TWh	TéraWatt-heure

### **Liste des abréviations**

MPPT:Maxpower pointTracking. DRL:Diode derouelibre

PIC:PériphiralInterfaceController(Microcontrôleur)

ALU:ElectricalEcrasableProgrammableReadOnlayMemory

EEPROM:Unitéarithmétiqueetlogique

DC: Courantcontinu. AC: Courantalt.

FF:Facteurdeforme.

V:Tensiondesortiedelacellule, I:Courant desortiedelacellule,

GPV:GénérateurPhotovoltaïque.

V<sub>pv</sub>:Tensiondesortiedelacellule(V). I<sub>pv</sub>:Courantdesortiedelacellule,(A).

I<sub>ph</sub>: Courant photo-généreuphoto-courant (A), I<sub>0</sub>: Courant desaturationdeladiode(A),

q:Charged'électronq(c),

k: Constant de Boltzmann (k=1.3810-23J/k),

$T_c$ : Température absolue de fonctionnement de la jonction ( $K^\circ$ ),

$T_a$ : Température absolue de fonctionnement de la jonction ( $K^\circ$ )  $m$ : Facteur d'idéalité de la diode ( $m$

$I_{cc}$ : Le courant de court-circuit  $V_{CO}$ : Tension de circuit-ouvert  $R_s$ :

Résistance série,

Rp: Résistance parallèle,

$\eta$ : rendement

Pmax: La puissance maximale (W)

Pri: puissance de rayonnement incident

Ni-Cd: nickel-cadmium PbAc: Plomb-acide NiMH: Nickel métal hydrures

LiIon: Lithium-lithium-ion

Ch: charge quotidienne (enAh)

R : réserve ou jours d'autonomie

Pd: profondeur de décharge pour chaque cycle

C: capacité de la batterie (enAh) SOC: state-of-charge

DOD: degré-of-déchargé

LED: Lampe à diode électroluminescente

MPT: Maximum Power Tracker

Em: Eclairement moyenne (W/m<sup>2</sup>).

TUC: Température d'utilisation de la cellule (°C). Ns: Nombre solaire en série

Np: Nombre solaire en parallèle.

Vmpp: Tension d'un module PV au point de puissance maximale (V).

S: Surface du module photovoltaïque (m<sup>2</sup>)

## NOTATIONS

**h**: Constante de Planck ( $6.62 \cdot 10^{-34}$  J.s).

**E<sub>g</sub>**: Energie de la bande interdite (eV).

**S** : Surface du module photovoltaïque (m<sup>2</sup>).

**E** : Eclairement (W/m<sup>2</sup>).

**R<sub>Se</sub>**: Résistance série équivalente ( $\Omega$ ).

**R<sub>Pe</sub>**: Résistance parallèle équivalente ( $\Omega$ ).

**A** : Le facteur d'idéalité de la jonction.

**I<sub>ph</sub>**: Le photo-courant (A).

**I<sub>0</sub>** : Courant de saturation (A).

**R<sub>p</sub>**: Résistances parallèle shunt. ( $\Omega$ )

**R<sub>S</sub>** : Résistance série ( $\Omega$ ).

**T<sub>c</sub>** : Température de jonction ( $^{\circ}$ K).

**G<sub>0</sub>** : L'éclairement de référence (1000 W/m<sup>2</sup>).

**T<sub>0</sub>** : La température de référence (298  $^{\circ}$ K).

**I<sub>cc</sub>**: Le courant de court-circuit (A).

**V<sub>co</sub>**: La tension de circuit ouvert (V).

**FF** : Facteur de forme.

**N<sub>s</sub>** : Nombre de modules dans le panneau en série.

**N<sub>p</sub>**: Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

**P<sub>m</sub>** : La puissance maximale produite PV (W).

**V<sub>m</sub>**: Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

**I<sub>m</sub>** : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

**V<sub>CO</sub>** : La tension à circuit ouvert de référence (V).

**V<sub>op</sub>** : Tension optimale (V).

**I<sub>op</sub>**: Courant optimum (A).

**V<sub>co</sub>**: Tension à circuit ouvert (V).

**I<sub>cc</sub>**: Courant de court-circuit (A).

# ***INTRODUCTION GENERALE***



## ***INTRODUCTION GENERALE***

La consommation d'énergie, durant le siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font confirmer, voir amplifier cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et de développement de certaines zones géographiques. Les gisements de ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. En outre les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel. Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec des énergies fossiles du point de vue coût et performance de production. Cependant, leurs systèmes de conversion en électricité sont encore des systèmes trop chers, et présentent quelques déficiences importantes en rendement et en fiabilité, mais pour cela, bien qu'il existe énormément de travaux de recherches prouvant la fiabilité de ces sources comme l'énergie photovoltaïque(PV), et l'énergie éolienne.

L'Algérie recèle un potentiel en énergies renouvelables parmi les plus grands au monde. Elle est un pays où les énergies fossiles sont disponibles en

abondance. Dixième réserve mondiale de gaz, troisième réserve africaine de pétrole, l'avenir énergétique de ce pays semble assuré.

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation (villes, usines...). L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final

Les réseaux intelligents ou Smart Grid, sont des réseaux électriques de nouvelle génération qui permettent l'approvisionnement durable en l'électricité avec une gestion optimale des coûts. L'utilisation de nouvelles technologies de l'information et de communication (TIC) permet une communication en temps réel entre les différents acteurs du réseau électrique, ainsi, elle permet un contrôle optimal de la demande sur le réseau, via les technologies d'internet [Mourshed, 15]. Dans un Smart Grid l'électricité est générée via de multiples sources qui existent sur le marché. Dans ce processus de fonctionnement, l'objectif visé est le mix énergétique, c'est-à-dire l'électricité peut être produite d'une source conventionnelle (Gaz naturel, charbon, diesel, etc.) ou des sources renouvelables (centrales CSP ou centrales photovoltaïque, parc éoliens, biomasse etc.), selon la demande et la disponibilité.

A la différence des réseaux électriques classiques, le Smart Grid accorde une grande attention au client, celui-ci devient, dans cette nouvelle configuration, un producteur d'énergie à base de sources renouvelables.

Chaque client peut produire de l'électricité pour ses propres besoins et injecter le surplus dans le réseau électrique ou le sauvegarder dans un parc de stockage. Ces réseaux décentralisés appelés aussi Smart Micro Grid, en utilisant au maximum les sources d'origine renouvelables, permettent de réduire la demande sur les centrales de production de l'électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules (PV) en série /parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (PV). Bien que l'énergie photovoltaïque soit connue depuis nombreuses années comme source pouvant produire l'énergie électrique allant de quelques milliwatts aux mégawatts, elle reste encore à un stade peu connu et ne développe pas encore dans de grandes propositions, notamment à cause de coût trop élevé des capteurs. De plus, plusieurs problèmes techniques doivent être résolus pour amener ces systèmes à un degré de maturité suffisant pour en faire un produit industriel à part entière. Les problèmes concernant autant le matériau de conversion photovoltaïque, qui reste cher à synthétiser, que la chaîne de conversion électrique, qui présente beaucoup de pertes lors d'une utilisation mal adaptées. Plusieurs lois de commande spécifiques ont été développées, permettant d'optimiser la production d'énergie photovoltaïque afin d'assurer un meilleur rendement de conversion.

Les innovations récentes dans les systèmes de production d'énergie décentralisée à petite échelle combinées avec les progrès technologiques dans les systèmes électroniques de puissance ont conduit à des concepts de

technologies de réseau futures telles que les micro-grids. Ces petites régions autonomes de systèmes d'alimentation peuvent offrir une fiabilité et une efficacité accrues et peuvent aider à intégrer l'énergie renouvelable et d'autres formes de production décentralisée. De nombreuses formes de production décentralisée telles que les piles à combustible, les photovoltaïques et les micro-turbines sont interfacées au réseau par le biais de convertisseurs électroniques de puissance. Ces dispositifs d'interface rendent les sources plus souples dans leur fonctionnement et leur contrôle par rapport aux machines électriques conventionnelles. Cependant, en raison de leur inertie physique négligeable, ils rendent également le système potentiellement vulnérable aux oscillations résultant des perturbations du réseau.

# ***CHAPITRE 1***

***Potentiel énergétique***

***en Algérie***

## I.1 Introduction :

L'Algérie recèle un potentiel en énergies renouvelables parmi les plus grands au monde. Elle est un pays où les énergies fossiles sont disponibles en abondance. Dixième réserve mondiale de gaz, troisième réserve africaine de pétrole, l'avenir énergétique de ce pays semble assuré.

Le potentiel énergétique solaire, qui a pour caractéristiques d'être inépuisable, non polluant et disponible partout, est bien pourvu en Algérie. Les spécialistes estiment toutefois que le réseau de mesures du rayonnement solaire est encore peu dense relativement à la superficie du territoire. Le potentiel en énergie solaire est déterminé par les critères d'implantation des équipements. L'ensoleillement annuel sur tout le territoire est parmi les plus élevés dans le monde. Il dépasse les 2000 heures, pouvant atteindre les 3900 heures sur les Hauts-Plateaux et le Sahara. A titre d'exemple, une station photovoltaïque d'une puissance de 5 KWc (kilowatts en puissance de crête), assure l'alimentation électrique des équipements de la station de mesure de référence du programme de recherche de la Veille de l'Atmosphère Globale, implantée sur le site de l'Assekrem, dans la wilaya de Tamanrasset. Le site se prête à cette solution pour deux raisons : éloignement du réseau conventionnel et ensoleillement quasi-permanent. C'est le cas des villages solaires de Sonelgaz qui se trouvent dans le Grand Sud. Exception, sans doute : près d'Alger, à Staouéli, une station-service de Naftal est équipée de vingt-deux panneaux solaires pour son alimentation en électricité. La gendarmerie nationale également a décidé d'utiliser l'énergie solaire pour les besoins de ses sites non reliés au réseau conventionnel.

Certes, les panneaux solaires prennent beaucoup de place mais ils sont faciles à transporter et peuvent être installés sur les toits, au bord des autoroutes et dans les coins les plus reculés, notamment les déserts. Un de leurs inconvénients est d'être exposé aux risques de vandalisme et de vols.

Quant à l'éolien, il est rentable là où il y a du vent et dépend fortement des conditions climatiques (trop de vent : usure et problèmes électriques ; peu de vent : pas de fonctionnement). Bien que le régime des vents en Algérie soit modéré (2 à 6 m/s), les spécialistes ont noté que son potentiel énergétique convient pour le pompage de l'eau en zone côtière et sur les Hauts-Plateaux. Un Atlas éolien, établi par le CDER, permet de localiser les régions destinées à recevoir les applications des systèmes de conversion éoliens. Il est prévu l'installation d'une centrale éolienne de 10 MW à Adrar. La Sonatrach a financé à travers sa Fondation Tassili la réalisation de la première éolienne algérienne à pales verticales et à géométrie variable, adaptée aux conditions climatiques algériennes. [1]

## I.2 Etat des lieux du mix Energétique

- Sur une capacité installée de 13 GW en 2012, 98% des installations fonctionnaient à l'énergie fossile ;
- Cette abondance de ressources fossiles a permis d'atteindre un taux d'accès à l'électricité de 100%.

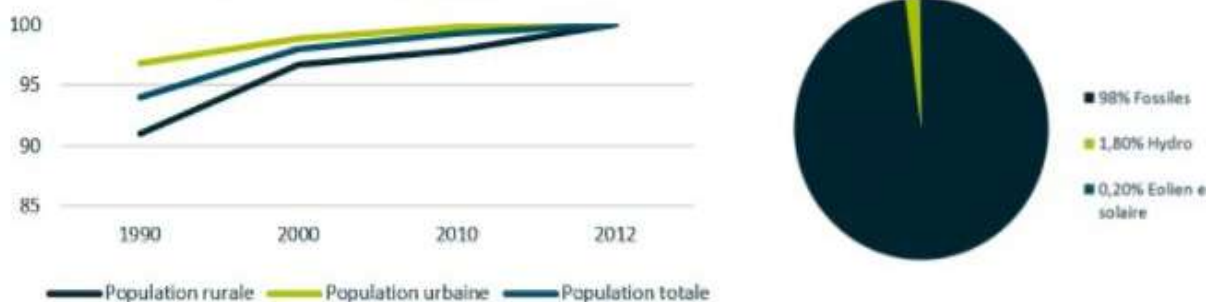


Figure 1: Accès à l'électricité en %

- En revanche, cette abondance crée une dépendance, comme le montre le mix énergétique, dont le gouvernement a conscience. Pour y remédier, un programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique a été mis en place en 2011 ;

- L'objectif de ce programme est de porter la part des énergies renouvelables à 40% du mix énergétique d'ici à 2030. [2]

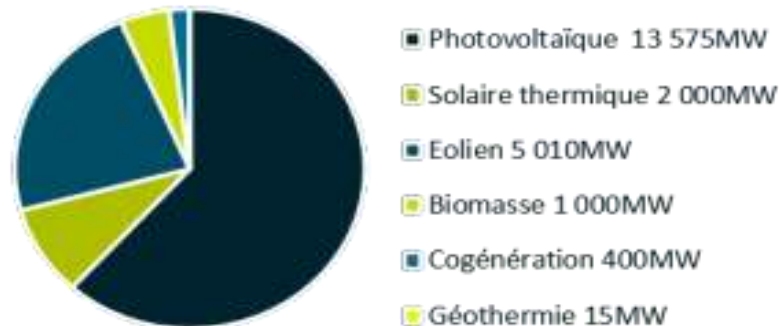


Figure n° 1.2 la part des énergies renouvelable

- À terme, 22 000 MW devraient être installés, dont 10 000 MW réservés à l'exportation, et répartis comme suit.
- Le développement des ENR sur le long terme est prévu en trois phases :
  - 2011-2013 : mise en place des projets pilotes ;
  - 2014-2015: début du déploiement du programme;
  - 2016-2020: réalisation à Grande échelle. [2]

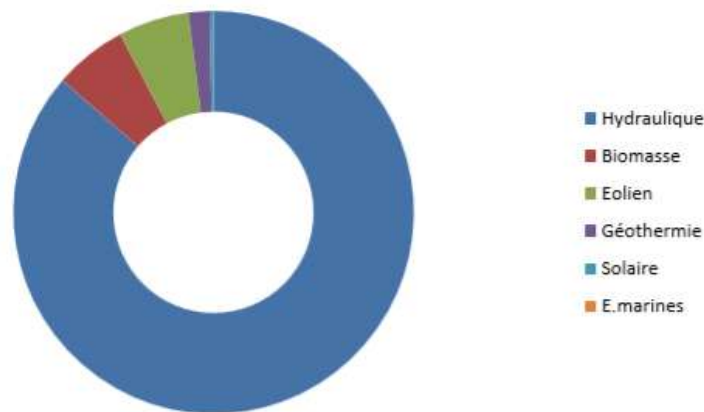
### I.3 Les énergies renouvelables en pourcentage :

Globalement, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité reste encore faible. 20 % de l'électricité produite dans le monde est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon (62,7 %) et par l'énergie nucléaire (17,1 %).

L'électricité renouvelable provient de sources distinctes. L'hydroélectricité est la principale d'entre elles avec 86,3% du total renouvelable. La biomasse est la seconde source avec 5,9%. Suivent l'éolien (5,7%), la géothermie (1,7%), le solaire (0,3%).<sup>8</sup> Toutefois, ces grandes masses sont extrêmement variables d'un pays à l'autre. Tout est, en effet, fonction des gisements d'énergies renouvelables. Ainsi, 99,2 % de l'électricité de Norvège (pays



pétrolier) est générée par les barrages. À l'inverse, les Pays-Bas, pays très sensible aux questions environnementales, utilisent très marginalement les énergies renouvelables pour produire leur électricité : moins de 5 %. La production d'électricité d'origine renouvelable a atteint 3763 TWh en 2008 (18,7% de la production totale). Cette part reste supérieure à la production d'origine nucléaire mais largement inférieure à l'électricité produite à partir des combustibles fossiles. [2]



**Figure I.3 : Structure de la production électrique d'origine renouvelable dans le monde (2008)**

Pour produire rapidement plus tout en polluant moins, il est donc indispensable d'avoir massivement recours aux énergies renouvelables : Les seules à n'émettre aucun GES (Gaz à Effet de Serre).

De nombreux pays riches développent de très importants parcs propres, constitués principalement d'éoliennes. [3]

## **I.4 Le potentiel des Energies Renouvelables en Algérie :**

### **I.4.1 Introduction :**

L'objectif de la stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie est d'arriver à atteindre, à l'horizon 2017 (le niveau de 5%10 dans le bilan électrique national). L'introduction des énergies renouvelables aura pour conséquence :

- une plus grande exploitation du potentiel disponible ;
- une meilleure contribution à la réduction de CO<sub>2</sub> ;

- une réduction de la part des énergies fossiles dans le bilan énergétique national ;
- un développement de l'industrie nationale ;
- l'absence d'emplois. Dans les pays d'Afrique du Nord, la production d'électricité est principalement basée sur les combustibles fossiles.

L'Algérie présente la plus faible part d'énergies renouvelables (Hydraulique) dans la structure de sa production électrique, plus de 99% de la production totale d'électricité provient des combustibles fossiles. Le peu qui reste (0,7%) provient des énergies renouvelables qui se résument pratiquement à une production hydro électrique. En raison des importantes sources d'énergie fossiles dont le pays dispose et de l'absence de politiques environnementales, le développement des énergies renouvelables a connu beaucoup de retard. Selon le Ministère de l'Energie et des Mines, la capacité nationale d'électricité dépasse les 8400 MW avec 2,4 MW crête seulement pour des énergies renouvelables (Année 2007)<sup>11</sup>. Aujourd'hui, compte tenu des enjeux que représentent ces sources d'énergies durables, leur promotion constitue un des grands axes de la politique énergétique et environnementale du pays. D'autre part, l'Algérie possède des atouts majeurs : un potentiel considérable des énergies renouvelables et une politique énergétique favorisant une contribution plus conséquente des énergies renouvelables dans le bilan national. Plusieurs projets ont été réalisés (électrification de plusieurs villages, production d'eau chaude sanitaire, etc.). Quant à l'utilisation du solaire thermique pour la production d'électricité, un projet d'une centrale hybride solaire-gaz (150 MW) située à Hassi R'mel. Pour la filière éolienne, le peu de projets réalisés concernent l'installation de pompes éoliennes. En plus, Un projet d'une ferme éolienne de 10 MW à Adrar est en cours d'étude. La stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie vise à porter la part des énergies renouvelables, à l'horizon 2015, à environ 5% de la production nationale d'électricité. [4]

### I.4.2 Le potentiel solaire :

À l'horizon 2020, le programme de développement des ENR a pour objectif de porter la part du solaire à 37% de la production d'électricité GWh/an.

L'Algérie possède un gisement solaire parmi les plus élevés dans le monde, la durée moyenne d'ensoleillement dans le Sahara algérien est de 3500 heures, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable dans cette région, s'il est exploité de manière économique, le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 KWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 KWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays.

**Tableau 1: le potentiel solaire en Algérie**

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Cette richesse d'énergies renouvelables, donne à notre pays une longévité de consommation énergétique propre, dont le solaire prend la part du lion, les figures 2.8 et 2.9, illustrent cette quantité énergétique au mois de juillet, contre le cas le plus défavorable, celle d'octobre.

### I.4.3 Le potentiel éolien :

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifié. En effet, l'Algérie, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La carte représentée ci-dessous montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. La première expérience en énergie renouvelable utilisée pour le pompage d'eau avec un éolien en Afrique a été effectuée à Adrar l'an 1957 au ksar ouled Aïssa, pour l'irrigation de 50 HEC, ce système éolien a été saboté en 1962 à la sortie des français de l'Algérie, L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 9 m/s, selon carte des vents. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux et la Sahara. Le potentiel énergétique est énorme sachant que les régions du sud d'Algérie se trouvent dans un couloir de vent de 6 m/s.

En juillet 2014, dans le cadre de la première phase du programme de développement des ENR, l'Algérie a inauguré sa première ferme éolienne de 10 MW.

Cependant, l'éolien reste peu développé en Algérie, où le potentiel est relativement faible.

C'est pour cette raison que la part de l'éolien dans le nouveau mix énergétique prévu pour 2020 demeure faible. [1]

#### I.4.4 Potentiel géothermique :

Les calcaires jurassiques du Nord algérien qui constituent d'importants réservoirs géothermiques, donnent naissance à plus de 200 sources thermales localisées principalement dans les régions du Nord-Est et Nord- Ouest du pays. Ces sources se trouvent à des températures souvent supérieures à 40°C, la plus chaude étant celle de "Hammam Meskhoutine" (96°C). Ces émergences naturelles qui sont généralement les fuites de réservoirs existants, débitent à elles seules plus de 2 m<sup>3</sup>/s d'eau chaude. Ceci ne représente qu'une infime partie des possibilités de production des réservoirs. Plus au Sud, la formation du continental intercalaire, constitue un vaste réservoir géothermique qui s'étend sur plusieurs milliers de Km<sup>2</sup>. Ce réservoir, appelé communément «nappe albienne» est exploité à travers des forages à plus de 4 m<sup>3</sup>/s. l'eau de cette nappe se trouve à une température moyenne de 57 °C. Si on associe le débit d'exploitation de la nappe albienne au débit total des sources thermales, cela représenterait, en termes de puissance, plus de 700 MW. On note cependant, Ces émergences naturelles qui sont généralement les fuites de réservoirs existants, débitent à elles seules plus de 2 m<sup>3</sup>/s d'eau chaude. Ceci ne représente qu'une infime partie des possibilités de production des réservoirs. [1]

#### I.4.5 Potentiel de biomasse :

La valorisation des déchets organiques et principalement des déjections animales pour la production du biogaz pourrait être considérée comme une solution économique, décentralisée et écologique avec une autonomie énergétique qui permettra un développement durable des zones rurales avec une quantité d'animal de plus de 25.000.000 de différents têtes, pour le potentiel végétal ,l'Algérie se subdivise en deux parties : -les régions selvatiques qui occupent 25.000.000 hectares environ, soit un peu plus de 10% de la superficie totale du pays. La forêt couvre 1 800 000 hectares et les formations forestières dégradées en maquis 1 900 000 hectares. Le pin

maritime et l'eucalyptus sont des plantes particulièrement intéressantes pour l'usage énergétique : actuellement elles n'occupent que 5% de la forêt algérienne. Les régions sahariennes arides couvrant presque 90% du territoire.

#### **I.4.5.1 Potentiel de la forêt :**

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes Equivalent Pétrole).

Le potentiel récupérable est de l'ordre de 3,7 Millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%.

(\* Source : Bilan 2010, Direction Générale des Forêts.

Potentiel national des déchets ménagers et assimilés (\*) :

05 millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de TEP/an.

(\* Source : Caractérisation des déchets ménagers et assimilés dans les zones nord, semi-aride et aride d'Algérie 2014, Agence Nationale des Déchets [5]

#### **I.4.6 Le potentiel hydraulique :**

Le secteur hydraulique possède 103 sites de barrage qui sont recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation. Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m<sup>3</sup>, mais finalement profitent peu au pays : concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évolue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m<sup>3</sup>, dont environ 2/3 pour les ressources en surface. 103 sites de barrages sont actuellement en exploitation. [5]

#### **I.5 Le secteur de l'électricité :**

Les combustibles (carbonés) d'origine fossile représentent environ 64%, avec le charbon comme combustible le plus important, contribuant à 40% de la génération de l'électricité. Et il intervient pour les trois quarts dans les

émissions de CO<sub>2</sub>. Aujourd'hui les centrales hydroélectriques de forte puissance comptent pour la majeure partie des énergies renouvelables. [4]

Un peu moins de la moitié de l'électricité produite est consommée dans le logement, environ un tiers dans l'industrie, un peu moins d'un dixième dans la production et le reste dans la transmission et la distribution<sup>13</sup>. La production annuelle mondiale d'électricité atteint les 18 000 TWh (18 000 milliards de kWh) représentant une moyenne de consommation de 2 000 GW (2 milliards de kW). Cette énergie électrique est obtenue selon les modes de production très divers, mais dans la plupart des cas, à partir de combustibles d'origine fossile. Le secteur de l'énergie électrique est la source où la croissance des émissions de gaz à effets de serre est la plus rapide, et on estime que ces émissions vont quadrupler entre aujourd'hui et 2050[6]

### **I.6L'Energie électrique en Algérie :**

Le système électrique algérien, comporte outre le système interconnecté, des réseaux autonomes alimentés par des turbines à gaz (Adrar, Illizi, In Salah) ou par des groupes diesel desservant les villes du Sud, à travers des réseaux de distribution. Donc, il est divisé en deux parties : une partie relative au réseau interconnecté national et une autre partie traitant de la production autonome du sud. L'électrification du pays faisait apparaître à l'indépendance une extrême disparité entre les zones urbaines et les zones rurales, reflétant la répartition géographique des populations sous la colonisation. A cette époque, seulement 450 centres et 1000 fermes de colons, pour 1600 km de MT et 1250 km de BT ont été raccordés au réseau d'électricité. En 1962, la production nationale d'électricité était de 1134 GWh pour une puissance totale installée équivalente à 568 MW. Depuis, ce secteur a connu à partir des années 70, avec le lancement des différents programmes de développement, une croissance appréciable (Tableau 2 ci-dessous). La croissance démographique, avec un taux de 3,2 % par an durant la période 1970-1990, a été le facteur déterminant pour l'accélération de l'électrification du pays. Le

taux national d'électrification est passé de 53 % en 1975 à 80 % en 1985, actuellement ce taux est de l'ordre de 95 %. Le raccordement des différents centres (urbains et ruraux) a permis l'accès à plus de cinq millions de foyers à l'électricité et plus d'un million de foyers au gaz naturel. Le raccordement également en haute et basse tension pour l'électricité et haute et basse pression en gaz a permis le développement des activités industrielles et artisanales dans toutes les régions du pays. Cette croissance, soutenue depuis l'indépendance, s'est accompagnée d'une évolution remarquable de la consommation énergétique nationale passant de 5 MTEP en 1970 à 36 MTEP en l'an 2005. Par habitant, celle-ci se traduit par une augmentation de 0,3 TEP/hab. à un peu plus de 1 TEP/hab. actuellement.

**Tableau 2 : Evolution de la population, puissance installée et production d'énergie en Algérie**

Année	1962	1970	1980	1990	2000	2005
Population (millions)	-	13,095	18,370	25,510	30,386	32,906
Puissance Installée(MW)	568	650	1837	4567	5922	6770
Production(GWh)	1134	1691	6220	15448	25008	33611

Les perspectives d'évolution, dans le contexte d'une relance économique, particulièrement dans le secteur des ménages et autres aussi que la réalisation d'un million de logements, indiquent que la demande d'énergie pourrait doubler d'ici 2020 (60 à 70 MTEP) [7]

### **I.6.1 L'électricité photovoltaïque :**

A la question, l'électricité solaire représentera-t-elle un jour une part significative de la production d'électricité dans le monde ? La réponse est sûrement oui. D'ailleurs, dans une étude publiée en juin 2009, on affirme que le photovoltaïque, en fonction de différents scénarios pourrait satisfaire entre 4% et 12% de la demande d'électricité en Europe d'ici 2020 à partir d'une multitude diffuse de producteurs/consommateurs privés reliés par les réseaux existants, plutôt qu'à partir de centrales solaires de grandes tailles.



L'Algérie aussi affiche son ambition, d'arriver à hauteur de 5% d'utilisation des énergies renouvelables, dont la grande partie sera destinée à l'électricité photovoltaïque d'ici 2017.

L'électricité en Algérie peut être produite à partir du photovoltaïque à travers les applications suivantes :

- les systèmes connectés au réseau ;
- l'hybridation des centrales diesel ;
- l'électrification rurale. En réalité, ces applications sont mutuellement exclusives, le recours à l'une d'entre elles dépend principalement du lieu d'utilisation [5]

### **I.7 Programme de développement des énergies renouvelables :**

A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique. Ces filières énergétiques seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance économique.

37 % de la capacité installée d'ici 2030 et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois.

Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse, en géothermie et en cogénération. Les projets ENR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes :

- **Première phase 2015 - 2020** : Cette phase verra la réalisation d'une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.
- **Deuxième phase 2021 - 2030** : Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable. La stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de formation et de capitalisation des connaissances, qui permettra à terme, d'employer le génie local algérien, notamment en matière d'engineering et de management de projets. Le programme EnR, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects [6]

### **I.7.1 Consistance du programme de développement des énergies renouvelables :**

La consistance du programme en énergie renouvelables à réaliser pour le marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière comme suit :

Tableaux I.3 programme de développement des énergies renouvelables

Unité : MW	1ere phase 2015-2020	2eme phase 2021-2030	TOTAL
<b>Photovoltaïque</b>	3000	10575	13575
<b>Eolien</b>	1010	4000	5010
<b>CSP</b>	-	2000	2000
<b>Cogénération</b>	150	250	400
<b>Biomasse</b>	360	640	1000
<b>géothermie</b>	05	10	15
<b>TOTAL</b>	4525	17475	22000

### I.8 politique nationale de développement des énergies renouvelables :

La politique nationale de promotion et de développement des énergies renouvelables est encadrée par des lois et des textes réglementaires. Les principaux textes régissant les énergies renouvelables sont : 1 la loi sur la maîtrise de l'énergie, 1 la loi sur la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable, 1 la loi sur l'électricité et la distribution publique du gaz, avec son corollaire le décret exécutif relatif aux coûts de diversification. Cette politique s'appuie sur un ensemble d'organismes et d'entreprises économiques prenant, chacun en ce qui le concerne, le développement des énergies renouvelables. Trois organismes, relevant du secteur de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique sont en activité depuis 1998 : 1 Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), l'Unité de Développement de la Technologie du Silicium (UDTS). Au sein du secteur de l'énergie, l'activité relative à la promotion des énergies renouvelables est prise en charge par le Ministère de l'Energie et des Mines et l'Agence de Promotion et de rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) qui a été créée en 1987 et qui dispose d'un département dédié à

cette activité. Par ailleurs, le Centre de Recherche et de Développement de l'Electricité et du Gaz (CREDEG), filiale du Groupe Sonelgaz, intervient dans la réalisation et la maintenance des installations solaires réalisées dans le cadre du programme national d'électrification rurale. Au niveau du secteur de l'agriculture, il faut signaler l'existence du Haut-Commissariat au Développement de la Steppe (HCDS) qui réalise des programmes importants dans le domaine du pompage de l'eau et de l'électrification par énergie solaire au profit des régions de la steppe. Sur le plan des opérateurs économiques, plusieurs sociétés sont déjà très actives dans le domaine des énergies renouvelables. On compte actuellement des dizaines d'opérateurs privés dont l'activité touche aux énergies renouvelables. Le Ministère de l'Energie et des Mines s'attelle à la constitution d'un noyau pour cette industrie autour duquel pourraient se cristalliser tous les efforts

L'objectif de la stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie est d'arriver à atteindre, à une part de ces énergies (y compris la cogénération) dans le bilan électrique national qui serait de 6%. L'introduction des énergies renouvelables aura pour conséquence : l'une plus grande exploitation du potentiel disponible, l'une meilleure contribution à la réduction de CO<sub>2</sub>, l'une réduction de la part des énergies fossiles dans le bilan énergétique national, l'un développement de l'industrie nationale, l'une création d'emplois. L'introduction des énergies renouvelables dans le bilan énergétique, à hauteur de l'objectif fixé, suppose des investissements importants, de plusieurs milliards de dinars, pour la période 2006-2010. Les coûts associés à cette politique volontariste de l'Etat pour le développement des énergies renouvelables seront assumés en partie par les consommateurs d'énergie et en partie par l'Etat. L'objectif global fixé nécessite aussi une forte implication des différents acteurs (autant institutionnels qu'économiques) qui doivent encourager l'expansion des sources d'énergie renouvelables.

### I.9 Les avantages et inconvénients des énergies renouvelables :

De même Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Elles donnent aussi plusieurs avantages :

- Plus les sources ne sont variées et renouvelables en même temps, plus l'indépendance énergétique n'est assurée.
- Décentralisation qui privilégie des petites unités de production locales.
- Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps.
- Pas d'émission de CO<sub>2</sub> Pour les plus parts des méthodes.
- Coût au kWh fixe, faible et stable.
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme. Il ne faut oublier que Les énergies renouvelables comportent plusieurs inconvénients :
- Investissement important.
- L'installation doit s'intégrer dans l'environnement.
- Variabilité de la production de l'éolien qui dépend d'un vent aléatoire.

### I.10 Production de l'électricité renouvelable:

Sur la base du nouveau programme des énergies renouvelables adopté par le gouvernement, il est prévu la réalisation d'une capacité de 9 043 MW, répartie comme suit :

- **Photovoltaïque : 5 443 MW** sur la période 2016-2025
- **Eolien: 2 600 MW** sur la période 2017-2025
- **CSP : 1 000 MW** sur la période 2021-2025
-

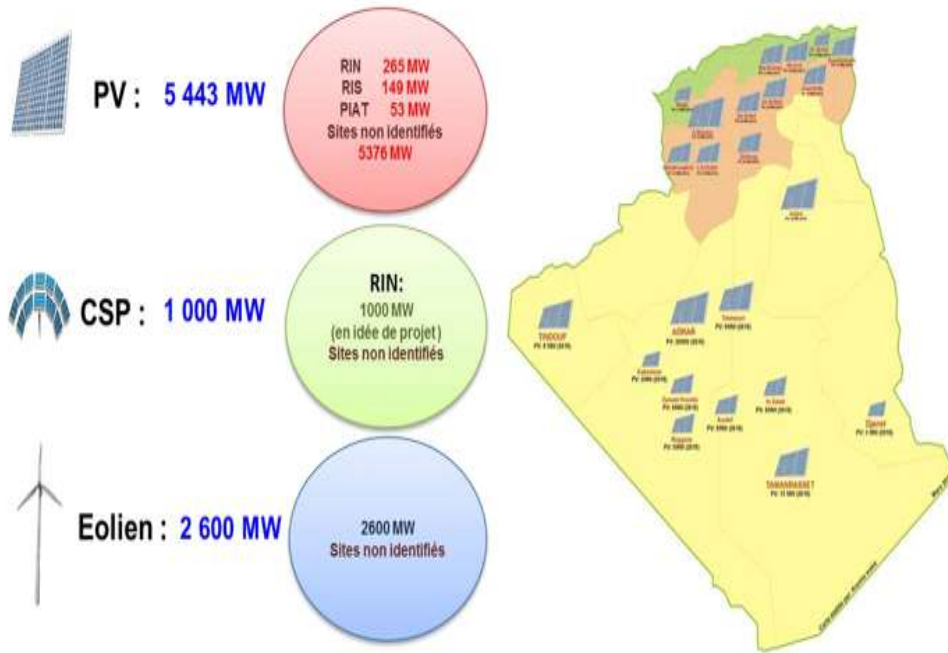


Figure 1.4 : Prévisions de développement en énergies renouvelables

La réalisation du programme EnR est tributaire de la disponibilité du financement. Aussi, l'évaluation financière est donnée à titre indicatif et n'est pas intégrée dans le montant global du plan de développement.

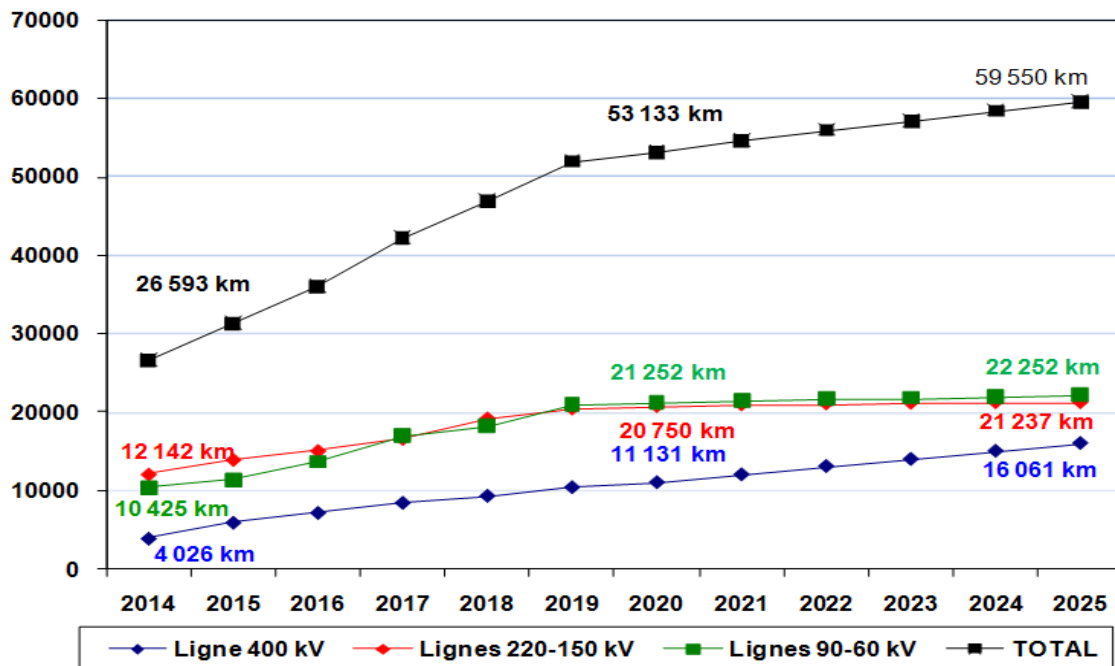
#### 7. En termes de Transport d'électricité

La longueur globale du réseau de transport de l'électricité à mettre en service sur la période 2015-2025 est de l'ordre de 34 370 km :

- 24 435 km, déjà décidés dont 1 554 km enrégénération,
- 9 935 km pour les lignes en idée de projet.

Ainsi, la longueur du réseau de transport de l'électricité atteindra 59 552 km en 2025.

### I.11 En termes de Réseaux de Distribution de l'électricité et dugaz



Figurel. 5 : Evolution des longueurs du réseau de transport de l'électricité

Le nombre de postes électriques de transformation à mettre en service sur la période 2015-2025 est de 537 postes dont :

413 postes déjà décidés (04 en réhabilitation),

124 postes en idée de projet.

Ces postes intègrent les avant-postes électriques sur la même période qui sont de 10 dont :

07 Avant-postes déjà décidés (05 en 400 kV et 02 en 220kV),

03 Avant-postes en idée de projet.

Le nombre total de postes et avant-postes sera de 834 à l'horizon 2025 avec une puissance installée de 142 160 MVA.

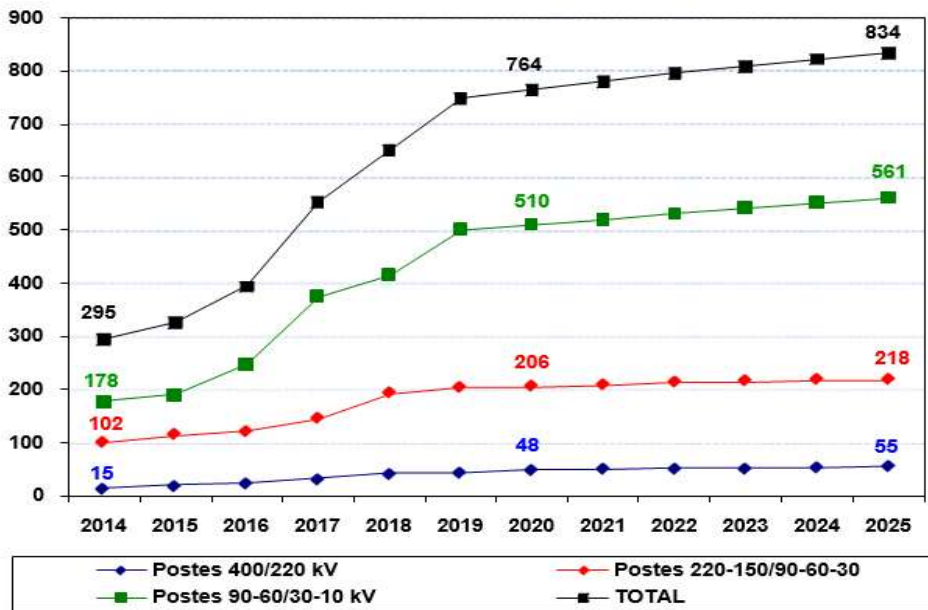


Figure6 : Evolution du nombre de postes électriques

Le plan de développement des réseaux de distribution, intègre les programmes d'électrification et de Distribution Publique du Gaz initiés par l'Etat, les programmes propres et les RCN ainsi que les équipements de maintenance et d'exploitation et les projets de modernisation de la gestion et de l'exploitation.

Les prévisions RCN ont été élaborées sur la base de l'historique des réalisations sur les dix dernières années.

Tableau 4 : prévision de réalisation des 4 sociétés de distribution

		Prévision de réalisation physique 2015-2025				
		SDA	SDC	SDE	SDO	Total
Réseau x Electricité	Réseaux (km)	13162	75 648	79 910	50 407	219 127
	Postes (nombre)	4029	43 399	33 497	15 580	96 505
	Branchements	392 624	1 568 171	438 430	564 852	2 964 077

Pour le Programme Propre (PP), l'objectif recherché porte sur:

- La normalisation des réseaux pour atteindre un ratio normatif de moins de 100 clientsBT/poste.



- La réduction des longueurs des départs MT
- L'amélioration de la qualité de la desserte électrique.
- Le changement progressif des réseaux cuivre en PE

Les prévisions de réalisations physiques des quatre sociétés de Distribution portent sur :

- En matière de réseau électrique : **219 127 km** de lignes, **96 505 postes** et **2 964 077** branchements.

### I.12 Représentation des productions d'électricité par producteur année 2016

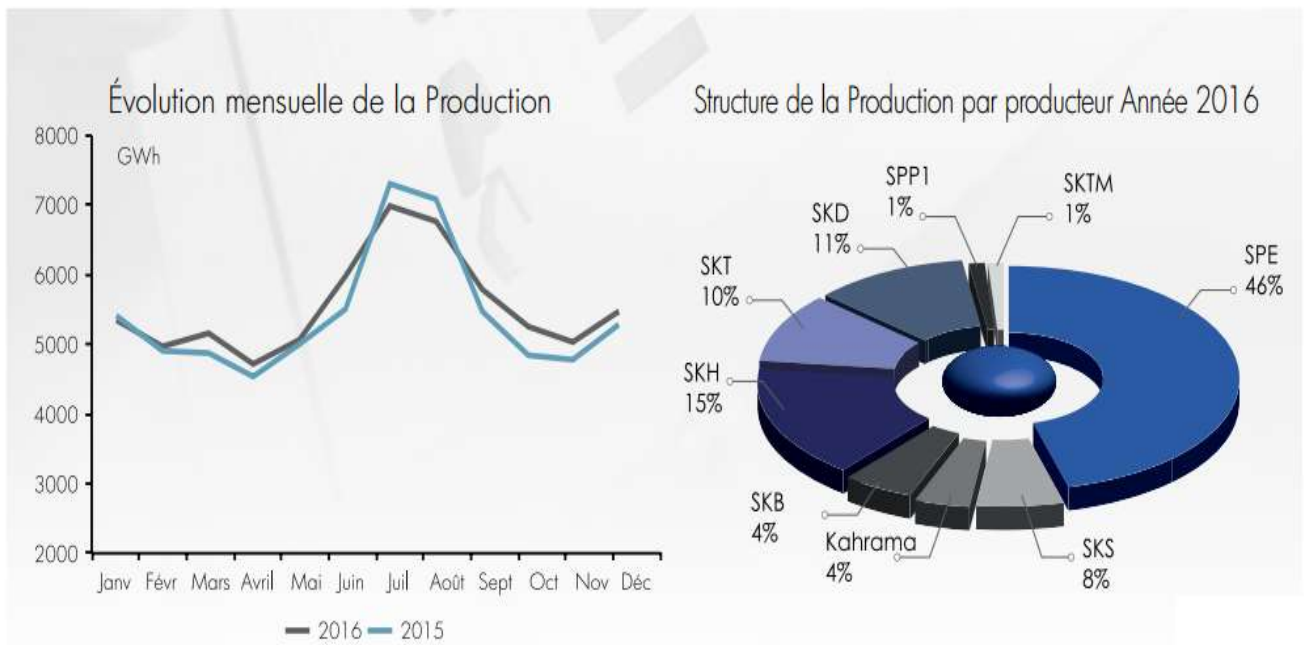


Figure I.7 représentations de production par producteur

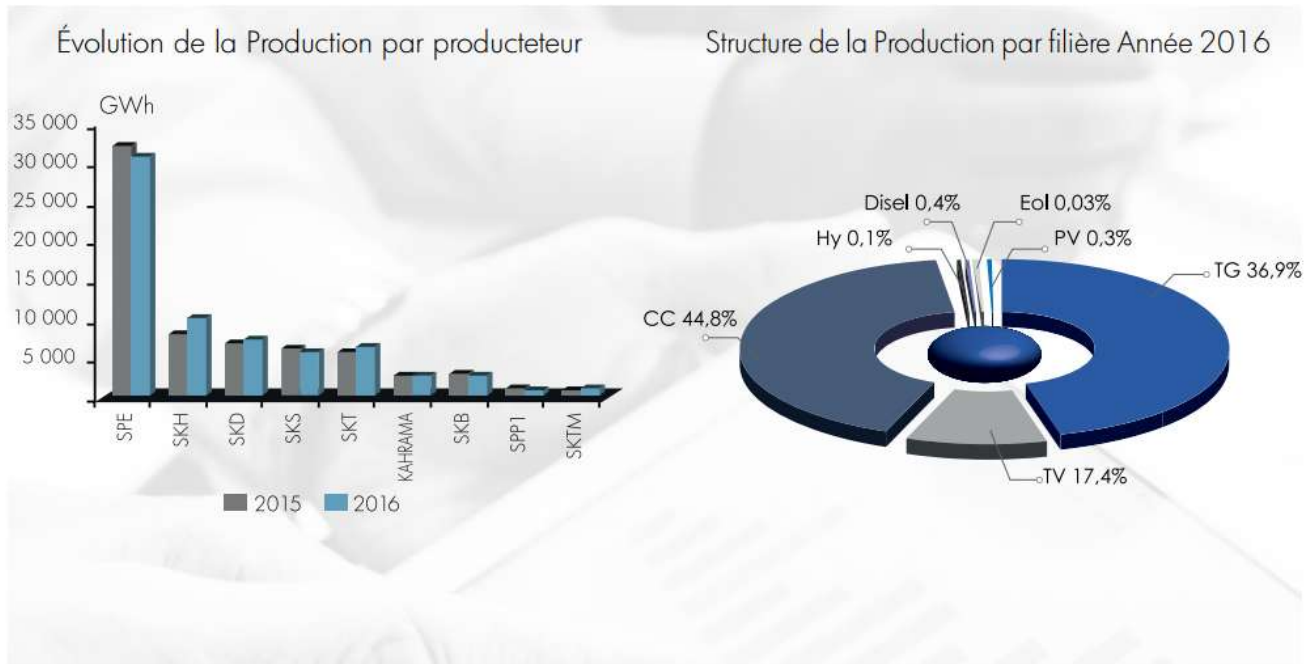


Figure 8 représentation de production par filiere

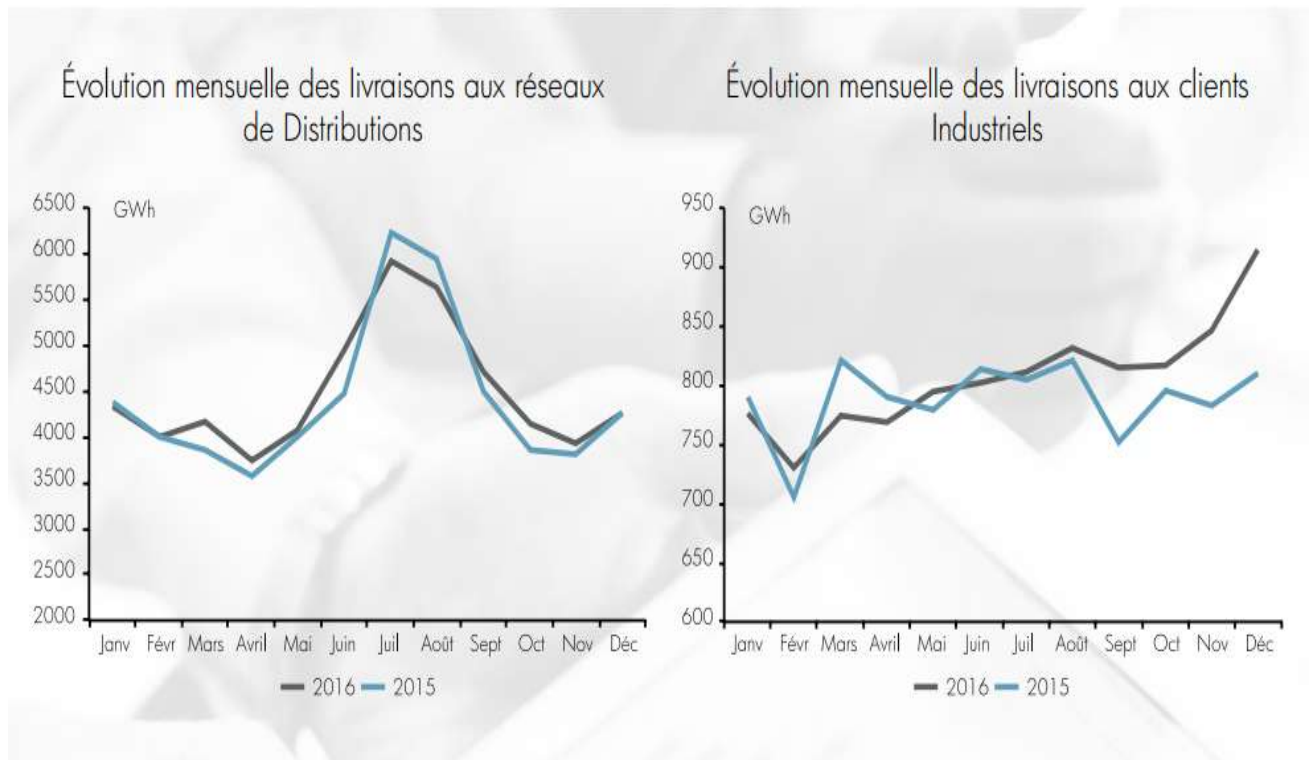


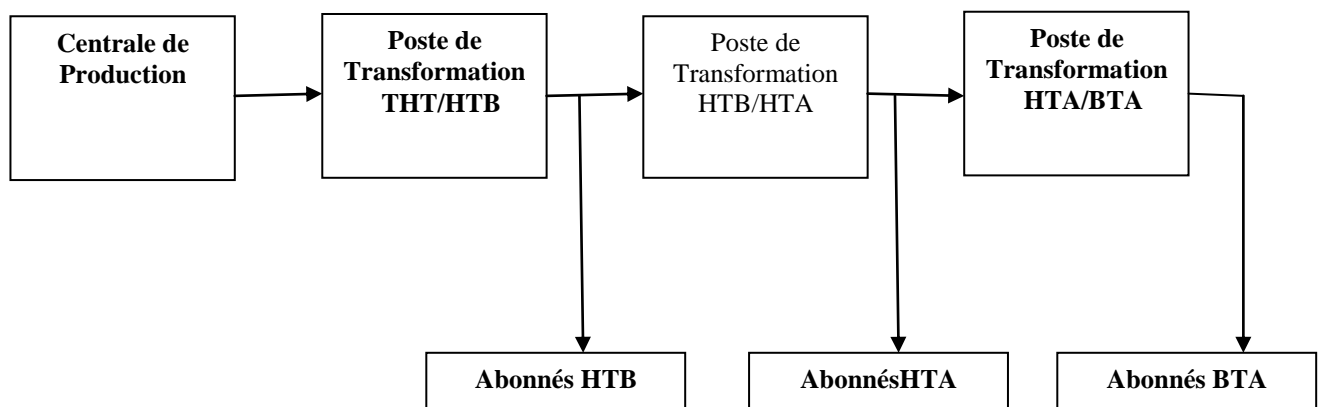
Figure 9 représentation mensuelle des livraisons aux(réseaux de distribution et clients industriels

***CHAPITRE 2***  
***Réseau De Transport Et***  
***De Distribution***  
***D'électricité***

**RESEAUX DE TRANSPORT ET DISTRIBUTION****II.1 INTRODUCTION**

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées. (Fig .II-1)

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation (villes, usines...). L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final [1].



*Figure.II-1 : Schéma d'un réseau électrique*

**II.2 Les niveaux de tensions des réseaux**

Les réseaux électriques sont hiérarchisés : (Fig .II-2)

D'une façon générale, la plupart des pays mettent en œuvre :

- Un réseau de transport THT 220 .... 800 KV
- Un réseau de répartition HTB 60 .....170 KV
- Un réseau de distribution HTA 1 ..... 50 KV
- Un réseau de livraison de l'abonné BTA 400/230 V

Cette hiérarchie c'est-à-dire, les niveaux de tensions utilisés varient considérablement d'un pays à l'autre en fonction des paramètres liés à l'histoire électrotechnique du pays, ses ressources énergétiques, sa surface et finalement des critères technico-économiques [8].

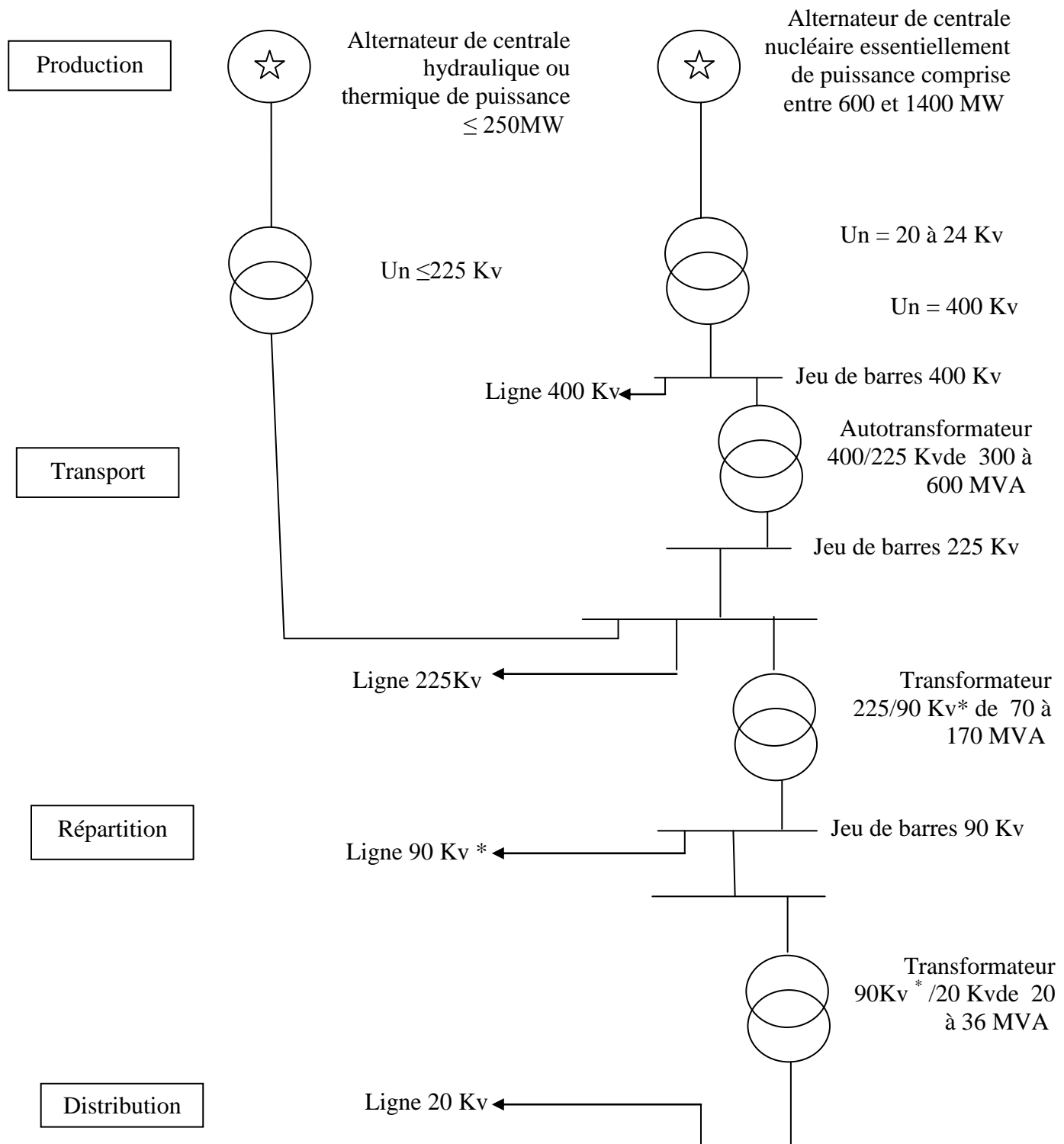


Figure II-2 : Organisation des différents niveaux de tension du système électrique [8]

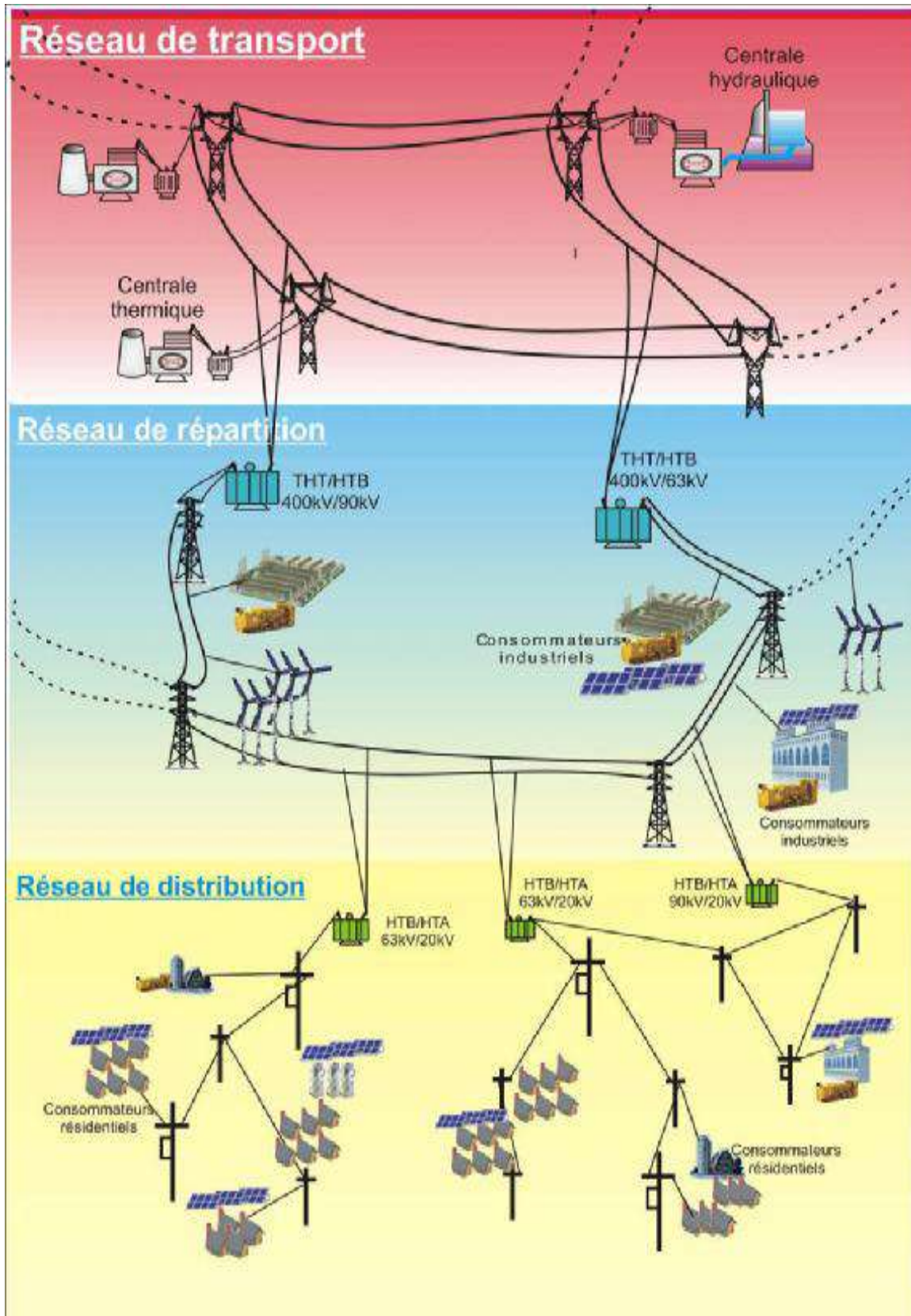


Figure II-3 : Architecture d'un réseau électrique moderne [9]

## **II.3 DESCRIPTION DES RESEAUX ELECTRIQUES**

### **II.3.1. Le réseaux de Transport THT**

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation.

C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances.

### **II.3.2 Le réseaux de répartition HTB**

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA)

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux.[7]

### **II.3.3 Le réseaux de Distribution HTA**

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport. Des lignes de distribution HTA partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements [10].

### II.3.4 Le réseaux de livraison BTA

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230V (380/220 en Algérie). Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles.

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution HTA aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BTA. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique.

Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. Sa structure, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement. Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement.

Le réseau BTA permet de distribuer au consommateur ; le 230 V (1 phase + neutre) - 2 fils Ou le 400 V (3 phases + neutre) - 4 fils. [11]

## II.4 CONSTITUTION DES RESEAUX ELECTRIQUE

### II.4.1 Les centrales électriques

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques,
- Les centrales hydroélectriques
- Les centrales solaires ou photovoltaïques,
- Les centrales éoliennes : Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont :
  - Une turbine en mouvement.
  - Un alternateur c'est-à-dire un aimant entraîné par la turbine et entouré d'une bobine qui produit le courant électrique.



### **II.4.1.1 Les centrales Solaire ou photovoltaïques :**

Cet autre moyen de fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire utilise les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux.

### **II.4.1.2 Les centrales éoliennes :**

L'énergie éolienne est produite sous forme d'électricité par une éolienne. Des éoliennes formées d'un mat surmonté d'un générateur électrique entraîné par une hélice, sont positionnées idéalement sur les plans d'eau ou les collines ventées.

## **II.4.2 les postes électrique**

### **II.4.2.1 Différents types de postes électriques**

Il existe plusieurs types de postes électriques :

- Postes de sortie de centrale : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau ;
- Postes d'interconnexion : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques ;
- Postes élévateurs : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur ;
- Postes de distribution : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels. [12]

### **II.4.2.2 les fonctions principales des postes électriques**

Les postes électriques ont 3 fonctions principales :

- le raccordement d'un tiers au réseau d'électricité (aussi bien consommateur que producteur type centrale nucléaire)
- l'interconnexion entre les différentes lignes électriques (assurer la répartition de l'électricité entre les différentes lignes issues du poste)
- la transformation de l'énergie en différents niveaux de tension [12]

### II.4.3 Les lignes électrique

Nous distinguons quatre types de lignes :

- Ligne de distribution à basse tension.
- Ligne de distribution à moyenne tension.
- Ligne de transport à haute tension.
- Ligne de transport à très haute tension .

#### II.4.3.1 Lignes de distribution BTA

Ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc.

#### II.4.3.2 Lignes de distribution HTA

Ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité.

#### II.4.3.3 Lignes de transport HTB

Ce sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de génération.

#### II.4.3.4 Lignes de transport THT

Ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV. [8]

### II.4.4 Différentes lignes électriques

- lignes aériennes
- lignes souterraines

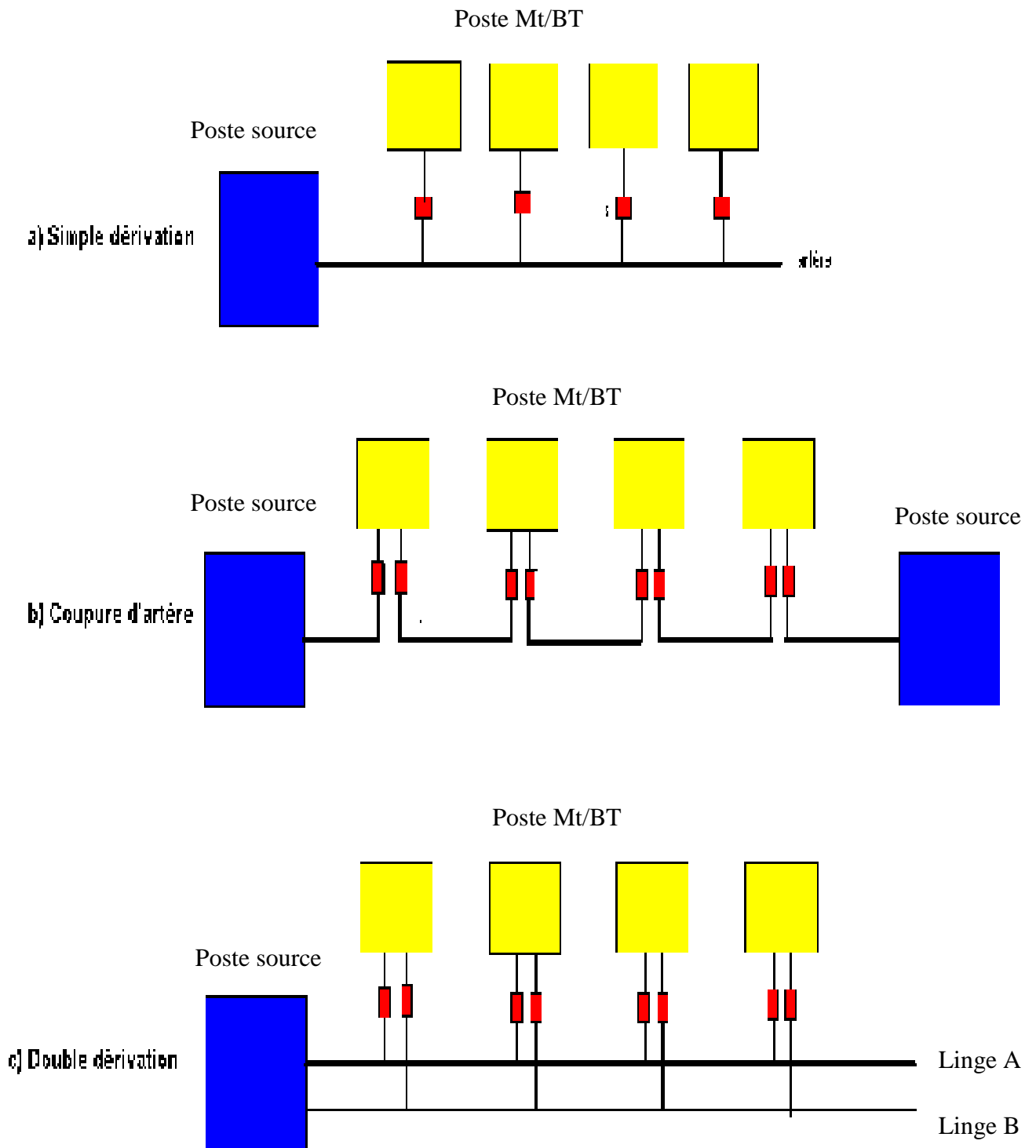
#### II.4.4.1 lignes aériennes

Une ligne aérienne est composée de pylônes (supports), de câbles conducteurs et des isolateurs.

#### II.4.4.2 Les lignes souterraines

La structure des réseaux souterrains est un seul type de ligne : les dorsales. Ces réseaux de faible longueur et forte section des conducteurs sont le siège de chute de tensions réduites. De ce fait, et tenant compte de l'importance des

incidents, il sera prévu une réalimentation soit par les réseaux voisins soit par un câble de secours.[9]



Figurell.4 - Types de raccordement de postes MT [9]

## II.5 VISION RESUME SUR RESEAU D'ADRAR

### II.5.1 Introduction :

La Direction de Distribution d'Adrar relève de la Société de Distribution de l'électricité et du gaz de l'Ouest, filiale du Groupe SONELGAZ.

La Direction d'Adrar gère le réseau électricité de toute la wilaya d'Adrar d'Est en Ouest et du Nord au Sud, qui s'étend sur une superficie de 428 659 Km<sup>2</sup>, soit un rayon d'action d'environ 500Km, administrativement composée de 11 daïra et 28 communes, où la distribution est assurée par 04 districts électricité

La Direction d'Adrar est composée de 04 districts électricité (Adrar, Reggane, Timimoun et Aoulef) et de 05 agences commerciales (Adrar, Zt.Kounta, Reggane, Timimoun et Aoulef).[13]

### II.5.2 SourceD'alimentation

- Centrale d'ADRAR
- Centrale Mobile de Kaberten
- Centrale zouitekounta
- Centrale timimoun
- Poste 220/30 KV ADRAR
- Injecteur 220/30 kV de Zt. KOUNTA
- Injecteur 220/30 kV de TIMIMOUN
- Poste 220/30 benitameur
- PS 220/30 kV d'AOULEF
- Injecteur 220/30 kV de KABERTENE
- Cabine Mobile 220/30 KV ADRAR
- Cabine Mobile 220/30 KV REGGANE
- Centrale de BBM
- Centrale de TALMINE

- Centrale de AIN BELBAL
- Centrale de M'GUIDEN[13]

### II.5.3 Centrales de Production :

Adrar :	130 MW
ZouitKounta	8x17 MW
In Salah :	92 MW
Timimoun	4x17 MW
Kaberten :	2X17 MW
BBM :	10,200 MW
Talmine :	9,300 MW
AinBelbal :	0,750 MW
M'Guiden :	0,320 MW

Centrales	Puissance crête disponible
PV Adrar	20
PV Kaberten	3
PV Timimoun	9
PV Z.Kounta	6
PV Reggane	5
PV Aoulef	5
PV In-Salah	5
Eolienne	10
Total	<b>60</b>

### II.5.4 Postes 220/30 KV :

PS Adrar : (2X80 MVA)

PS benitameur (2x40 MVA)

PS Aoulef: (2X40 MVA)

Injecteur Zt.Kounta: (1X40 MVA)

Injecteur Timimoun : (1X40 MVA)

Injecteur Kaberten : (1X40 MVA)

CM 220/30 KV Adrar : (1X40 MVA)

CM 220/30 KV Reggane: (1x40 MVA)

### II.5.5 Distribution

Les gammes de tensions utilisées dans la distribution au niveau d'Adrar sont 30 KV pour la haute tension A et 400 V et 230 V pour la basse tension.

Les postes (HTA) gérée par la Direction d'Adrar sont en nombre de : 06

Poste HTA / HTA Adrar,

Poste HTA / HTA Fenoughil,

Poste HTA / HTA Reggane,

Poste HTA / HTA Aoulef,

Poste HTA / HTA Timimoun,

Poste HTA / HTA Aougrou. [10]

Les consistances du réseau géré par la DD d'Adrar illustrées dans le tableau ci-après :

*Tableau II-2 :consistances du réseau d'Adrar*

District	TYPE DE RESEAUX	RESEAUX MT(Km)	RESEAUX BT(Km)
		30 Kv	B2
ADRAR	Aérien	1047,649	252,768
	Souterrain	121,985	17,994
	Torsadé		188,779
	<b>Total</b>	<b>1169,634</b>	<b>459,541</b>
REGGANE	Aérien	716,433	155,274
	Souterrain	35,759	6,376
	Torsadé		80,888
	<b>Total</b>	<b>752,192</b>	<b>242,538</b>
TIMIMOUN	Aérien	1123,428	247,359
	Souterrain	36,648	7,337
	Torsadé		511,124
	<b>Total</b>	<b>1160,076</b>	<b>765,820</b>
AOULEF	Aérien	303,227	70,845
	Souterrain	28,068	5,914
	Torsadé		82,965
	<b>Total</b>	<b>331,295</b>	<b>159,724</b>
<b>Total Direction Adrar</b>	Aérien	3190,737	726,246
	Souterrain	222,460	37,621
	Torsadé		863,756
	<b>Total</b>	<b>3413,197</b>	<b>1627,623</b>

II.5.6- Schéma Synoptique du réseau 220KV

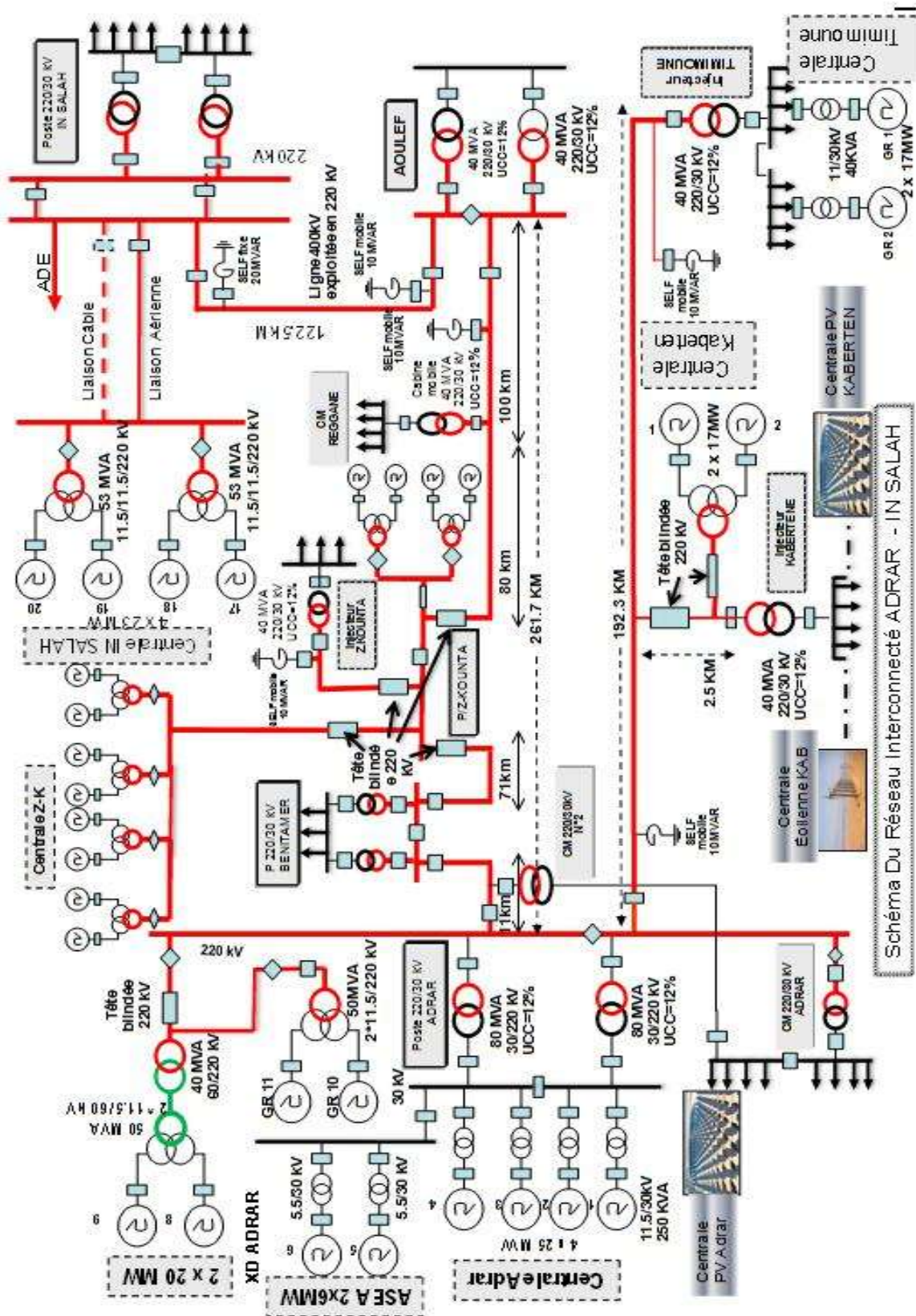


Figure II- 5 :Schéma Synoptique du réseau 220KV



## Conclusion

On a fait dans ce chapitre une étude générale du réseau électrique, avec l'étude de ses différents composants nécessaire à la production, au transport, à la distribution et à la livraison de l'énergie.

Le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs.

Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité :

**Production = Consommation + pertes** Le réseau électrique doit permettre de livrer aux utilisateurs un bien de consommation adapté à leurs besoins, caractérisé par :

Une puissance disponible, fonction des besoins quantitatifs du client ;

Une tension fixée, fonction de cette puissance et du type de clientèle ;

Une qualité traduisant la capacité à respecter les valeurs et la forme prévues de ces deux paramètres et à les maintenir dans le temps [8]

# ***CHAPTER 3***

## ***Réseau Intelligente***

### III-1 SMART GRID

Un smart grid (littéralement «réseau intelligent») est un réseau électrique reliant ensemble la production, la consommation et le stockage de l'électricité et les coordonnant de manière autonome. Ce type de réseau permet par conséquent de passer d'un système de production dépendant de la demande à un système de consommation basé sur l'offre, qui devra à l'avenir s'adapter aux variations aléatoires de la production d'énergies éolienne et solaire. Associé à d'autres technologies telles que le pompage-turbinage ou encore les installations à gaz à cycle combiné, particulièrement flexibles, ce réseau doit contribuer à améliorer la sécurité d'approvisionnement, à réduire les coûts relatifs au réseau de distribution et à l'énergie de réglage, à intégrer les énergies renouvelables au réseau et à améliorer l'efficacité de l'ensemble du système.

Un smart grid associe le réseau électrique déjà existant à des applications issues des technologies de l'information et de la communication. Cependant, si plusieurs technologies actuelles peuvent d'ores et déjà être utilisées, elles doivent être tout d'abord testées sous la forme de composants individuels, car la réalisation technique dépend de la stabilité et de l'efficacité de leur interaction. En effet, à part dans certains projets de recherche, aucun smart grid garantissant un pilotage complètement automatisé des appareils consommateurs et des installations de production n'existe encore dans le monde: il ne s'agit pour l'heure que d'un concept.

Les tests effectués actuellement sur les smart meters, déjà déployés à large échelle dans certains pays, constituent une première étape dans la mise en œuvre de ces réseaux intelligents. Cette technologie doit inciter les consommateurs finaux à économiser l'électricité et encourager la maîtrise de l'injection décentralisée. Leur introduction en Suisse est toutefois freinée notamment par les questions relatives à la protection des données, par

l'absence de normes dans ce domaine et par un manque de clarté dans la répartition des rôles et des coûts.

Le succès des smart grids dépendra en grande partie de l'intérêt économique ainsi que de l'atteinte au confort individuel des différentes parties prenantes. Une fois que cet intérêt se profilera et que les pertes de confort seront réduites au minimum, la probabilité d'une mutation de notre réseau électrique actuel en smart grid émergera également.

### III.2 Généralités

Un smart grid est un réseau électrique reliant à la fois la production, la consommation et le stockage de l'électricité et les coordonnant de manière centralisée. Au sein de smart grids, la communication rapide et bidirectionnelle entre les différents composants des réseaux et les systèmes de production, de stockage et de consommation permet d'harmoniser la gestion. De ce fait, ces réseaux sont en mesure de garantir une exploitation plus efficace du système (à la fois en termes d'énergie et de coûts) en vue des exigences futures [14].

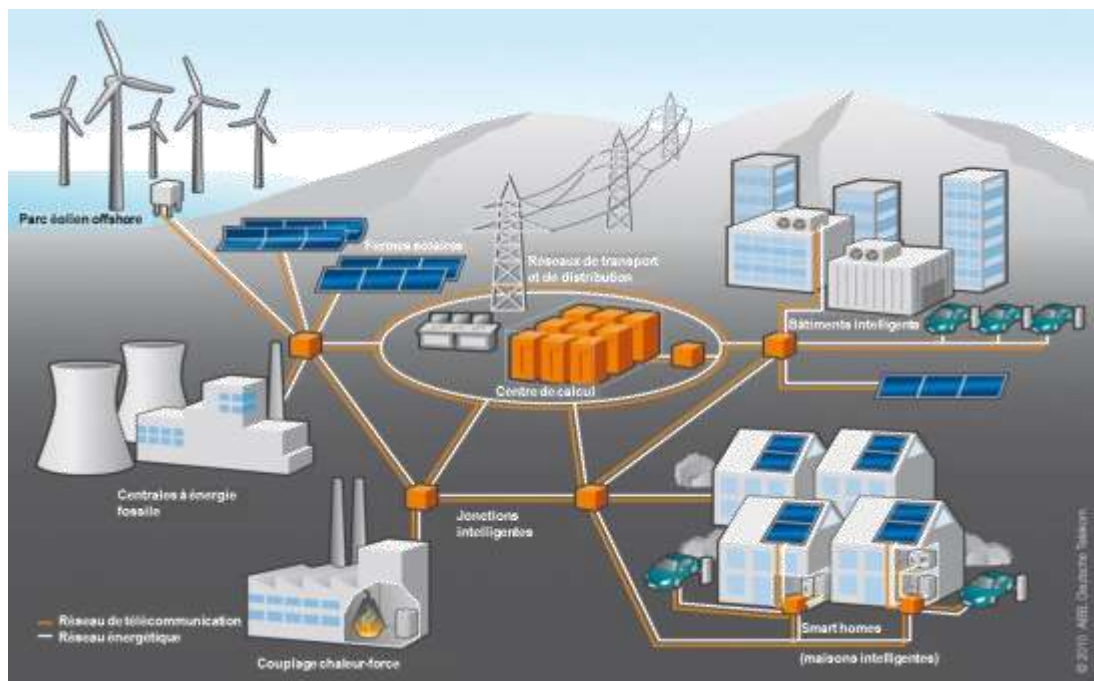


Figure III.1. Représentation schématique d'un smart grid. Source : ABB, Deutsche Telekom,

L'électricité ne cesse de circuler et ne peut donc être stockée qu'au prix de processus très complexes. Il est en revanche possible de la transformer en une autre forme d'énergie : elle peut par exemple permettre de pomper l'eau d'un lac de retenue et être ainsi stockée sous forme d'énergie potentielle. On peut également accumuler l'énergie sous forme chimique dans une batterie et la convertir ensuite de nouveau en électricité. Ce procédé ne permet cependant de stocker que d'infimes quantités et occasionne des pertes.

La production d'électricité est constamment adaptée à la consommation afin de garantir que la quantité d'énergie disponible sur le réseau soit en permanence égale à celle consommée, les différences à court terme entre l'offre et la demande étant compensées via l'énergie de réglage.<sup>1</sup> Au sein des smart grids en revanche, un algorithme dans un centre de calcul permet de coordonner rapidement et de manière complètement automatisée l'offre et la demande en jouant activement sur la charge ou sur la production, ou en alimentant le système d'accumulation. En fonction de sa conception, le centre de calcul peut couvrir une zone de desserte décentralisée ou un réseau de transport.

Les smart grids servent non seulement à piloter des installations de production, mais également à connecter ou déconnecter les charges en fonction des besoins. La gestion de la demande (*demand side management*, DSM), par exemple, permet d'adapter la demande à la production et ainsi de réduire les besoins de stockage en cas d'augmentation de l'injection d'énergies renouvelables stochastiques.

Le système actuel et les smart grids sont caractérisés par les différences suivantes: [15].

- Système traditionnel:
- Structure hiérarchisée
- Centrales généralement de grande taille

- Nombre peu élevé de grandes installations centrales de stockage de l'énergie (centrales de pompage-turbinage)
- Utilisation non généralisée des technologies de l'information et de la communication (TIC)
- Smart grid:
  - Nombreux composants de différentes tailles
  - Intégration d'installations de production décentralisées (DEG: *génération d'énergie distribuée*)
  - Intégration de nombreuses petites installations de stockage décentralisées (véhicules électriques)
  - Composants plus intelligents
  - Utilisation constante des TIC jusqu'aux consommateurs finaux

Cette gestion intelligente du réseau doit au final permettre de préserver ou d'augmenter la sécurité d'approvisionnement, de réduire les coûts liés au réseau de distribution et à l'énergie de réglage, d'intégrer les énergies renouvelables au réseau et d'améliorer l'efficacité de l'ensemble du système.

Ces exigences sont prises en compte par les divers projets lancés dans différents pays intégrant des smart grids, les priorités et les principaux éléments variant cependant en fonction de la situation initiale locale. Aux Etats-Unis, le réseau étant en partie vétuste, c'est la sécurité d'approvisionnement qui prime; en Europe en revanche, la part croissante accordée aux énergies renouvelables dans la production conduit à intégrer des installations de production décentralisée et aléatoire au réseau électrique.<sup>3</sup> Dans tous les cas, une unité de calcul doit gérer de manière autonome la production, la charge ainsi que le stockage, et optimiser l'ensemble du système via le flux d'électricité, jusqu'ici non commandé.

La première étape du lancement d'un smart grid consiste à mesurer la consommation de manière très pré-cise à l'aide de smart meters, les valeurs

étant transmises de manière automatisée. Pour les applications actuelles telles que la lecture à distance des compteurs ou des pronostics de production des sources d'énergie renouvelable, une mesure des données tous les quarts d'heure et un envoi quotidien aux exploitants du réseau de distribution suffisent. L'allocation future de l'offre et de la demande par un centre de calcul nécessite une résolution temporelle élevée et un échange de données très rapide.

Les smart meters sont donc indispensables à la mise en place d'un smart grid, mais ne suffisent pas. Une communication bidirectionnelle avec l'unité de gestion centrale s'avère, tout comme la mesure de la consommation, essentielle. Les smart meters peuvent en effet non seulement envoyer des données de mesure, mais également recevoir des signaux de commande et piloter les appareils consommateurs lorsque ceux-ci disposent de l'équipement adéquat. Une communication fiable entre les appareils de mesure et le centre de calcul est donc primordiale. Elle est aujourd'hui déjà rendue possible par les technologies d'information et de communication modernes.

### III.3 Réalité aujourd'hui

Hormis certains projets de recherche, aucun smart grid garantissant un pilotage complètement automatisé des appareils consommateurs et des installations de production n'existe encore dans le monde: il ne s'agit pour l'heure que d'un concept.

L'étude sur l'analyse de l'état et le besoin de développement de technologies pour un smart grid suisse («Zustands analyse und Entwicklungsbedarf von Technologien für ein Schweizer Smart Grid»), réalisée en 2013 par Consentec pour l'OFEN, en arrive à la conclusion suivante (traduction libre): «L'analyse des différentes technologies smart grid a montré que les technologies considérées couvraient un large éventail de principes fonctionnels et de possibilités d'utilisation. Chaque technologie

présente des avantages spécifiques, et aucune technologie ne peut être écartée parce qu'elle serait inadaptée techniquement et/ou économiquement. On peut néanmoins imaginer qu'au cours des développements futurs, certaines technologies se révèlent moins appropriées que d'autres et que, par conséquent, on n'y donne pas suite. D'un autre côté, de nouvelles technologies, peut-être encore non envisageables du point de vue actuel, peuvent aussi s'y ajouter. Comme l'a montré le débat détaillé, les composants techniques nécessaires pour la plupart des technologies sont déjà disponibles aujourd'hui, ou au moins en cours d'expérimentation. Souvent, toutefois, les concepts d'utilité et de pilotage sont encore en développement, ou des normes adaptées et un cadre général en matière de régulation sont encore à créer, de sorte qu'une utilisation immédiate est pour l'instant impossible. On peut toutefois partir du principe que, pour une grande part des technologies, on aura atteint dans les 5 prochaines années environ – grâce aux projets R&D et aux projets pilotes – une expérience et une maturité suffisantes pour permettre une application pratique.» [16].

### ***III.3.1 Situation actuelle en Suisse***

Contrairement à la situation au sein de l'Union Européenne, aucun objectif politique en matière d'introduction de smart meters n'a encore été défini en Suisse, et aucune pression ne se fait ressentir de la part des consommateurs finaux en vue d'obtenir une meilleure efficacité énergétique et de réaliser des économies de consommation.<sup>5</sup> Ce type de compteurs est installé chez les grands consommateurs (plus de 100 MWh par an) lorsqu'ils demandent une gestion de leur énergie ou changent de fournisseur. Pourtant, de nombreux exploitants de réseaux de distribution hésitent à introduire ces appareils de manière harmonisée sur tout le territoire, car ils ne sont pas sans présenter des aspects négatifs. Les avantages et les inconvénients du smart metering sont résumés ci-après (principalement pour la Suisse).



### *III.3.1.1. Avantages et inconvénients des smart meters et des smart grids*

Outre la mesure, la communication en temps réel de la consommation au client sur des écrans et des sites Internet permet à ce dernier de l'analyser et de la surveiller, et ainsi de gérer la charge et d'économiser de l'électricité. Ces informations immédiates doivent l'inciter à mieux gérer sa consommation, et partant, à la réduire.

Des tarifs en fonction des heures de la journée existent déjà en Suisse depuis fort longtemps: la plupart des fournisseurs d'électricité proposent en effet un haut tarif et un bas tarif. Avec l'introduction de smart meters, des tarifs évolutifs basés davantage sur le prix de gros pourraient même être proposés. Cette incitation

financière pourrait encourager le consommateur à adapter rapidement ses besoins à la charge du réseau. Il faut en effet que la consommation soit reportée dans le temps, mais aussi réduite pour réaliser réellement des économies.

Les smart meters peuvent également permettre de maîtriser l'injection décentralisée, en assurant une communication bidirectionnelle: les données envoyées mais aussi les signaux de commande reçus peuvent être utilisés pour piloter des installations de production réparties et des appareils consommateurs. Les installations bénéficiant d'une rétribution à prix coûtant et disposant d'une puissance installée de plus de 30 kVA sont équipées d'un smart meter. Celui-ci est utilisé actuellement pour calculer la charge, qui sert à prévoir la production quotidienne. Théoriquement, il devrait pouvoir permettre en outre de commander l'utilisation de l'installation.

Si ces systèmes offrent des avantages, ils présentent également un certain nombre de risques et d'inconvénients. C'est pourquoi leur diffusion est assez lente, du moins en Suisse. Avec le système de régulation actuel, le gestionnaire du réseau de distribution n'a pas la possibilité de **répercuter** les **coûts** liés au smart meter, bien que le client final tout comme le fournisseur

puissent en tirer avantage. Selon la Commission fédérale de l'électricité (ElCom), les coûts ne peuvent être répercutés sur le client final que lorsqu'ils contribuent à améliorer l'efficacité ou la sécurité du réseau. Sans la mise en place d'un smart grid, les smart meters ne sont rien d'autre que des appareils de mesure n'obtenant pas automatiquement les effets mentionnés. Pour que l'investissement porte ses fruits, le législateur doit déterminer à qui incombe les coûts.

Par ailleurs, des normes techniques garantissant que les différents composants nécessaires à l'exploitation du système, tels que les compteurs et les logiciels de lecture à distance, ne seront pas associés les uns aux autres de façon aléatoire, font défaut. Les gestionnaires de réseau de distribution courent alors le risque d'être tributaires de fournisseurs de systèmes. Cette dépendance revêt une importance stratégique lorsque la technique n'est pas au point et que l'investissement nécessaire est de taille. Le besoin de standardisation a toutefois été reconnu dans le secteur des compteurs et de l'électricité. C'est pourquoi l'association Smart Grid Suisse s'est fixé comme priorité de garantir l'interopérabilité et la compatibilité des appareils et des systèmes smart grid via une norme de branche suisse ouverte, indépendante des fabricants [17].

Enfin, les incitations économiques sont également trop faibles pour entraîner la diffusion des smart meters. Les faibles coûts de l'énergie n'incitent guère les consommateurs à économiser et la demande de smart meters avec incitation de la consommation fait défaut.<sup>7</sup>

Grâce à la télécommande centralisée, les gestionnaires de réseau de distribution suisses disposent déjà d'un moyen de gérer la charge en pilotant les appareils consommateurs tels que le chauffage électrique, les chauffe-eau électriques et les pompes à chaleur. Les pointes de charge sont ainsi lissées et la charge du réseau équilibrée. La plupart des fournisseurs d'électricité proposent d'ores et déjà une incitation financière visant à

assouplir la charge avec le haut tarif/bas tarif. Les avantages d'un smart grid sont déjà en partie exploités aujourd'hui.

Un smart grid pourrait par ailleurs générer un avantage supplémentaire puisque les smart meters et les techniques de communication modernes donnent la possibilité de commander individuellement les différents appareils, ce qui affine ainsi la gestion de la charge. L'intégration de petites installations de production décentralisée serait ainsi facilitée pour le gestionnaire de réseau, ce qui pourrait le convaincre d'introduire un smart grid.

### III.3.1.2 Premières expériences menées dans le cadre de projets pilotes

Bien que l'avenir du smart metering en Suisse soit encore incertain, la branche de l'électricité s'intéresse beaucoup à la question, comme en témoigne le nombre de conférences, d'articles et de projets pilotes ad hoc. En la matière, peu importe la taille de l'EAE, c'est le besoin d'action qui s'avère déterminant.<sup>8</sup> Dans la perspective d'un lancement ultérieur, les entreprises souhaitent être parfaitement parées en termes de processus car le sujet est souvent complexe et il semble que «rien ne puisse remplacer l'expérience.»<sup>9</sup> Une préparation anticipée pourrait se révéler, sur le marché futur, un atout apportant des avantages compétitifs décisifs. Autres raisons de mener des essais sur le terrain: l'introduction de la lecture à distance, qui entraîne une réduction des coûts grâce à l'optimisation des processus, ainsi que le remplacement des installations de télécommande centralisée.

Actuellement, quelques entreprises se forgent une première expérience dans le domaine du smart metering. Des premiers résultats issus d'un projet pilote de l'Entreprise d'électricité du canton de Zurich (EKZ) sont disponibles. Ils sont toutefois décevants si on les compare aux économies escomptées des ménages que l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a chiffrées à 5 à 6 % sur la base d'une étude d'Econcept et d'expériences issues de l'étranger<sup>10</sup>. A l'instar de l'OFEN, l'EKZ a constaté que les

économies réalisées atteignaient leur niveau maximal lorsque le consommateur pouvait consulter le niveau de sa consommation,11 directement affiché à l'écran sous forme de graphiques. Par rapport à un groupe de contrôle, seules des économies de 3% ont toutefois pu être constatées. La représentation de la consommation sur un site Internet a donné des résultats similaires, tandis que seules des économies minimales de 0,4% ont pu être constatées chez les clients finaux découvrant leur consommation dans leur facture mensuelle.

Dans le cadre de son projet pilote, la société Central Schweizerische Kraftwerke (CKW) teste des tarifs évolutifs et leur influence sur le comportement des consommateurs. Les résultats confirment les conclusions des analyses de l'EKZ et de chercheurs de l'Université d'Oxford12 selon lesquelles le potentiel d'économie est faible. Dans les ménages en possession d'un smart meter, un recul de la consommation d'environ 3% a été observé par rapport à un groupe témoin possédant des compteurs traditionnels, et les économies sur la consommation étaient proportionnellement plus faibles en hiver qu'en été.

### ***III.3.2 Situation en Europe***

Au sein de l'UE, aucun smart grid au sens d'un réseau électrique commandé n'a encore vu le jour non plus. L'introduction du smart metering en revanche constitue dans de nombreux pays une première étape importante vers l'instauration de ce type de réseau.

La directive 2006/32/CE a fixé un objectif de déploiement des smart meters dans 80% des ménages privés d'ici à 2020 et dans 100 % d'ici à 2022. Cette directive joue donc aussi un rôle important dans la large diffusion des appareils de mesure.13 En 2011, le Joint Research Centre (JRC) de la Commission européenne a publié le premier catalogue européen de projets Smart-Grid (voir illustration 2). Celui-ci chiffre notamment les dépenses réalisées jusqu'à présent par les Etats-membres de l'UE et les répartit en

catégories, telles que la construction d'une infrastructure de smart meter («smart meter», rouge), l'intégration de différentes technologies smart grid («systèmes intégrés», bleu foncé), des projets avec participation active des ménages («applications domestiques», jaune) ou des analyses des potentiels de stockage («stockage», vert foncé).

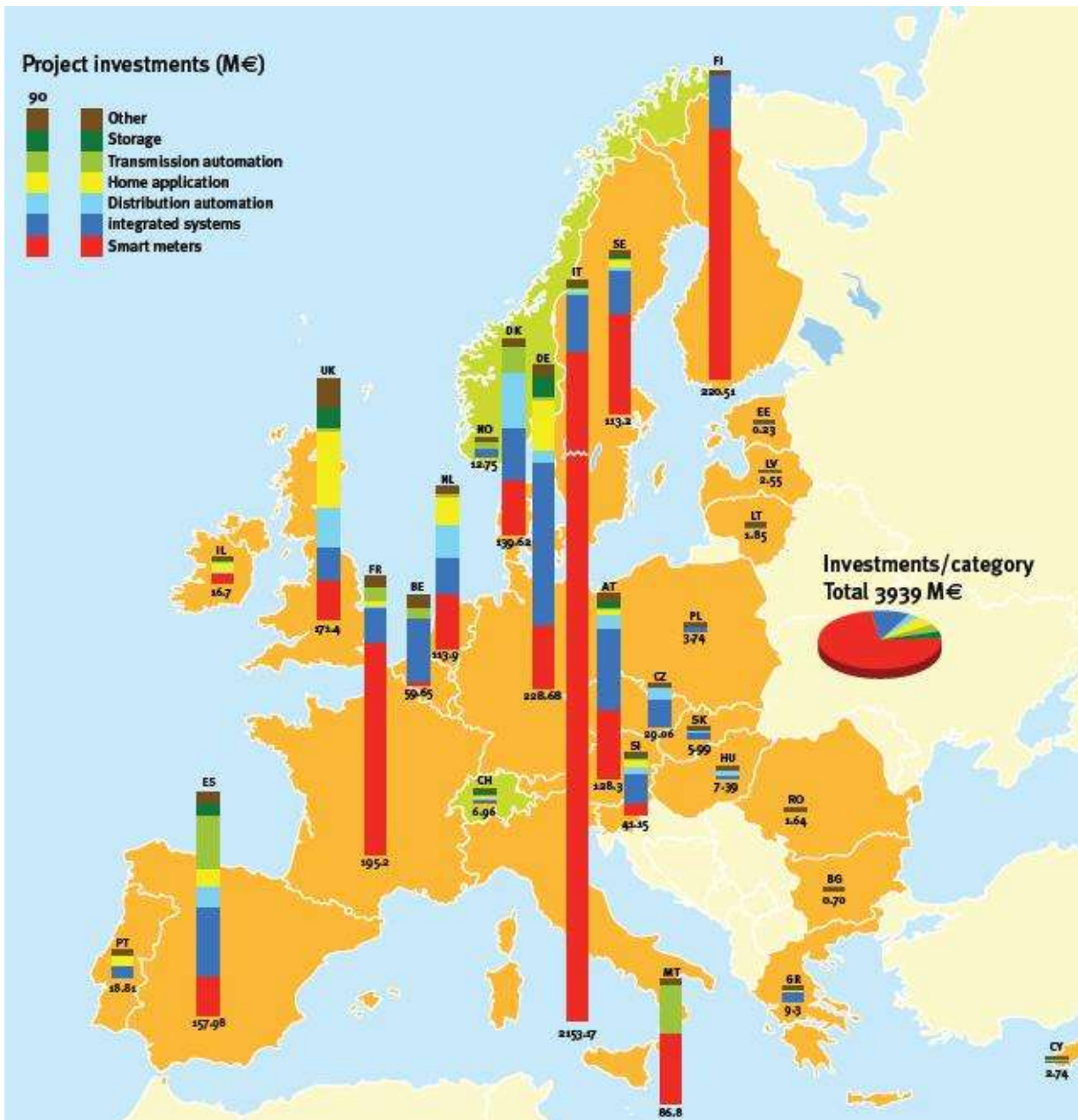


Figure III.2. Investissements dans des projets smart grid en Europe. Source: Centre de recherche commun de la Commission européenne, 2011.

Actuellement, l'UE donne la priorité à l'installation de smart meters. L'illustration 2 montre que près de 75% des dépenses y ont été consacrées. Dans certains pays comme la Suède ou l'Italie, ces appareils sont déjà déployés sur tout le territoire. Les raisons de ce lancement sont cependant très différentes: la Suède souhaitait une lecture à distance mensuelle gratuite, tandis que l'Italie entendait principalement lutter contre le vol d'électricité.

Quant à l'UE, sa principale raison d'introduire le smart metering est l'économie d'énergie. Bien que des premières analyses montrent que l'effet escompté, en intégrant le client final, ne répond souvent pas aux attentes, la plupart des Etats de l'UE prévoient un déploiement sur tout le territoire. L'intérêt économique escompté devrait profiter au client final tandis que les coûts incomberont au gestionnaire de réseau. Dans certains pays comme l'Allemagne ou les Pays-Bas, la mesure et la lecture des valeurs ont été libéralisées afin de renforcer la concurrence et baisser les prix. Les fournisseurs n'ont toutefois pu obtenir d'avantages en termes de volumes et les coûts ont augmenté au lieu de chuter. La libéralisation a finalement entraîné de faibles taux d'installation, ce qui explique les discussions menées actuellement en Allemagne visant à déterminer si la responsabilité doit à nouveau être transférée au gestionnaire de réseau. C'est chose faite aux Pays-Bas.

#### **III.4 Evolutions futures**

Le smart grid existe dans le monde entier en tant que concept de gestion du réseau électrique, devant répondre aux exigences de sécurité de l'approvisionnement, d'efficacité, d'intégration d'énergies renouvelables et de coûts faibles. Bien que de nombreuses parties concernées attendent un déploiement de ce type de réseau, aucun smart grid avec pilotage automatique des appareils consommateurs et des installations de production n'a été réalisé pour l'heure. Il est donc difficile d'évaluer l'évolution dans ce

domaine. Certains composants existent d'ores et déjà; la mise en place d'un smart grid dépendra de leur avancement technologique.

C'est d'une part la pression politique qui décidera de la mise en place – et de la rapidité de celle-ci – de smart meters sur tout le territoire suisse. L'UE pourrait exiger que la directive 2006/32/CE soit reprise dans les contrats bilatéraux de façon à contraindre légalement les entreprises d'approvisionnement en électricité (EAE) suisses à l'installation de ces compteurs. Mais les politiques pourraient également ouvrir le marché de l'électricité à la concurrence grâce à une révision de l'ordonnance sur l'électricité et à une libéralisation effective du marché de l'électricité pour les ménages et les petits consommateurs. Le passage à un autre fournisseur déclencherait un échange de données entre acteurs du marché indépendants les uns des autres, qui ne pourrait avoir lieu qu'avec des smart meters.

Les nouveaux besoins des clients pourraient par ailleurs favoriser la diffusion du smart metering. Il existe aujourd'hui déjà des modèles d'affaires efficaces dans le secteur immobilier ou dans les chaînes commerciales (telles que WalMart aux Etats-Unis), qui surveillent de manière centralisée l'ensemble du réseau de filiales jusqu'au niveau des congélateurs-coffres et partant, leur permettent de réaliser des économies importantes d'énergie et de coûts.

L'ajout d'installations de production décentralisées peut également favoriser la multiplication des smart meters. Les installations RPC à partir d'une puissance installée de 30 kVA sont déjà équipées à l'heure actuelle de smart meters, afin que les valeurs de mesure actuelles de la production puissent étayer les prévisions. Il pourra également être envisagé ultérieurement de piloter les installations de cette façon à l'avenir. Avec l'introduction de la réglementation sur la consommation propre, des smart meters seront nécessaires notamment dans les immeubles d'habitation collective, pour la répartition individuelle de la production. La maximisation

de la consommation propre via une gestion de la charge à l'intérieur du bâtiment et éventuellement via des accumulateurs de courant aura pour conséquence que l'on se dirigera vers une smart grid.

### **III.4.2 Evolution d'autres technologies**

Un smart grid relie le réseau électrique existant à des applications liées aux techniques d'information et de communication. Il s'agit donc d'une association ciblée de plusieurs technologies qui interagissent au sein d'un smart grid, après avoir tout d'abord été testées en partie et souvent séparément. L'évolution future du smart grid dépend par conséquent également des progrès réalisés en matière de composants individuels:14

- WAMS (Wide Area Measurement System): ce système saisit l'état d'un réseau haute tension en temps réel et identifie au moyen de satellites GPS d'éventuels problèmes d'instabilité. La technologie WAMS a été distinguée par le Massachusetts Institute of Technology (MIT) comme une des dix technologies susceptibles de «changer le monde».
- SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition Systems): ces systèmes permettent de mesurer des milliers de points de mesure dans des réseaux électriques nationaux et régionaux. Le système modélise les réseaux, simule l'exploitation de la charge, localise les erreurs, prévient les défaillances et contribue au négoce de l'énergie. Situé à Karnataka en Inde, le plus grand système SCADA du monde comprend 830 sous-stations, qui approvisionnent 16 millions d'habitants en électricité et est en mesure d'augmenter de 50% l'efficacité de l'exploitation du réseau et de réduire de 70% la perte de minutes de consommation.
- FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems): les FACTS permettent de commander les flux de charge et d'optimiser le transport de puissance. Dans certains cas, la capacité de transmission d'un réseau peut même être doublée. Ils aident par ailleurs à diminuer le nombre de pannes et à stabiliser le réseau.



- HVDC (*high voltage direct current* ou courant continu haute tension CCHT): les systèmes HVDC transforment le courant alternatif produit par les centrales pour qu'il soit acheminé sous forme de courant continu. Les HVDC se prêtent parfaitement à un transport d'énergie électrique occasionnant peu de pertes, à partir de sites reculés ou difficiles d'accès (p. ex. liaisons sous-marines) ou très lointains, à l'instar de la liaison HVDC de 2000 km de long qui relie Xiangjiaba et Shanghai en Chine, et qui devrait permettre une réduction de plus de 30% des pertes liées au transport. Ce système, l'un des plus puissants au monde, présente une puissance de transmission de 6400 MW pour une tension de  $\pm 800$  kV. Autre avantage des HVDC: les coûts d'infrastructures peu élevés (nombre moins important de lignes et de pylônes, eux-mêmes de taille plus réduite), ce qui compense les coûts d'investissement élevés pour les postes de conversion.
- V2G (Vehicle to Grid): ce concept repose sur l'exploitation des batteries de véhicules électriques pour stocker ou prélever du courant. Pour être efficace, l'application nécessite cependant un nombre suffisant de véhicules et un nombre encore plus important de bornes publiques disponibles. En outre, une succession trop rapide de chargements et de déchargements peut avoir un impact négatif sur la durée de vie des batteries, ce qui oblige les fabricants à limiter leurs prestations de garantie

### **III.4.3 Autres facteurs de pérennité**

Contrairement au réseau électrique actuel, les smart grids intègrent la commande d'appareils différents, ce qui ne peut fonctionner que si la technologie sous-jacente est standardisée. L'association Smart Grid Suisse, fondée en 2011, a donc pour principal objectif de garantir la compatibilité des appareils et systèmes smart grid via une norme de branche suisse ouverte et indépendante des fabricants.

Le stockage de l'énergie jouera un rôle capital dans les futurs smart grids. La production d'installations d'injection stochastique exige une vraie flexibilité sur le front des appareils consommateurs, qui peut être obtenue grâce à un nombre suffisant de stockages de taille adéquate. Les accumulateurs thermiques, tels que les congélateurs, sont à cet égard particulièrement appropriés: ils peuvent être chargés sans aucune perte de confort pour le consommateur final.<sup>16</sup> Les futures conditions-cadre réglementaires définiront le potentiel de gestion de la charge en fonction de la grandeur des stockages et de ce fait, influenceront de manière décisive sur les possibilités qu'offrent les smart grids.

Les EAE suisses disposent en outre déjà avec la télécommande centralisée et le système de haut/bas tarif, largement répandu, de moyens efficaces pour assurer la gestion de la charge. Le smart grid devra donc présenter des atouts de taille pour s'imposer en tant que technologie, par exemple en intégrant le client final à la gestion de charge via l'affichage de smart meters, via le pilotage individuel de différents appareils ou des incitations financières basées sur des tarifs évolutifs.

A l'heure actuelle, le smart grid en est au stade de la recherche. La réalisation technique constitue un défi, qu'il est toutefois parfaitement possible de relever avec les moyens disponibles. Son lancement est quasiment certain mais il est difficile pour l'heure d'en prévoir la date. Le groupe cible à qui le smart grid offrira un avantage économique réel n'a en effet pas encore été clairement déterminé. S'agit-il des gestionnaires de réseau, qui économisent des coûts grâce à la gestion automatisée de la charge? Du client final qui, en tant que «Prosumer» (*producer and consumer*), souhaite participer activement au marché de l'énergie? Ou bien la politique va-t-elle finir par imposer l'intérêt social d'une gestion respectueuse des ressources énergétiques par le biais de smart grids?

L'intérêt économique des smart grids pour les parties concernées jouera un rôle décisif dans leur percée. Dès lors que cet intérêt se sera profilé clairement, la transformation de notre réseau électrique en smart grid sera possible.

Un transfert de charge significatif ou une meilleure réduction de la consommation peut être attendu en cas de diffusion d'appareils de consommation finale intelligents et leur pilotage pour smart grid et smart metering. Cette étape est prévue à moyen ou long terme, soit d'ici à 2050. Les smart meters feront alors partie intégrante de tout réseau d'approvisionnement.

# ***CHAPTER 4***

## ***Modélisation Et Simulation***



## VI.1 INTRODUCTION

A ce jour, le développement massif du solaire photovoltaïque, en tant que moyen de production d'électricité raccordé au réseau, reste pénalisé par son coût de production encore très élevé. Notamment des cellules aux couches minces photovoltaïques.

A partir du moment où un système photovoltaïque est raccordé au réseau électrique d'un immeuble et que cet immeuble est raccordé au réseau public de distribution d'électricité, le système photovoltaïque est considéré comme connecté au réseau public de distribution d'électricité [18].

## VI.2 INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE :

### VI.2.1 QU'EST-CE QUE LES INSTALLATIONS PV FOURNISSENT ?

Un système photovoltaïque, aussi appelé système PV, produit de l'électricité. Des modules photovoltaïques comme les panneaux bleutés que l'on est en train d'installer sur ces photos génèrent du courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil. Cette énergie peut aussi bien combler des besoins isolés d'électricité qu'être envoyée sur un réseau électrique, servir à alimenter des appareils d'aussi faible puissance qu'une calculatrice ou une horloge, que de contribuer à alimenter les grands réseaux électriques nationaux.[15]

Les modules photovoltaïques génèrent du courant continu. Aussi, selon les applications, un système photovoltaïque comprendra des appareils permettant de convertir l'électricité en courant alternatif, nécessaire au fonctionnement des appareils les plus communs. Les systèmes photovoltaïques autonomes comprendront également des accumulateurs

Électriques permettant de stocker l'électricité produite pendant les heures ensoleillées pour la rendre disponible la nuit et par temps nuageux.

Les systèmes photovoltaïques permettent également le pompage de l'eau pour alimenter en eau potable des communautés et des troupeaux, à partir de puits ou de nappes d'eau éloignés d'une source électrique. Les systèmes de pompe à eau ont la particularité de pouvoir facilement stocker le produit auquel on est intéressé dans un réservoir, ce qui est plus facile que de stocker de l'électricité.

Les communautés isolées apprécient les nombreux avantages des systèmes photovoltaïques, comme on le voit dans ce village du Bengale occidental en Inde.

Tout d'abord les modules photovoltaïques sont la source d'électricité la plus fiable parmi les systèmes électrogènes. Ils n'ont pas de pièce mobile, et n'ont besoin d'aucune surveillance pendant plusieurs dizaines d'années. Ceci est un atout dans des régions où la main d'oeuvre spécialisée n'existe pas à un coût abordable. De tels endroits ne se trouvent pas uniquement dans les pays en voie de développement mais aussi en mer et dans l'espace pour l'exploration duquel les premiers systèmes photovoltaïques ont été développés.

Les systèmes photovoltaïques ont peu de composants et s'entretiennent facilement. Ils sont aisés à utiliser même par des utilisateurs ayant peu de compétences techniques, à la différence d'un groupe électrogène à moteur thermique.

Les systèmes photovoltaïques sont modulaires, c'est-à-dire que l'on peut facilement ajuster le nombre de modules photovoltaïques en fonction des besoins d'électricité et de l'ensoleillement disponible. De plus, de tels modules existent dans des tailles différentes. Ainsi, un ménage peut d'abord se contenter d'un simple

kit d'éclairage comprenant un seul module, ce qu'il peut se permettre d'acquérir. Si quelques années plus tard, un téléviseur est acheté, il suffira alors d'ajouter un autre module photovoltaïque et/ou un autre accumulateur électrique.

Enfin, ces systèmes sont très appréciés des utilisateurs pour leur silence, pour l'absence d'odeurs générées et aussi pour leur faculté de fournir de l'éclairage sans chaleur, un atout dans les pays chauds.

[18]

### VI.2.2 Description des installations PV

Des exemples d'architectures d'installations PV sont donnés dans la Figure III-1

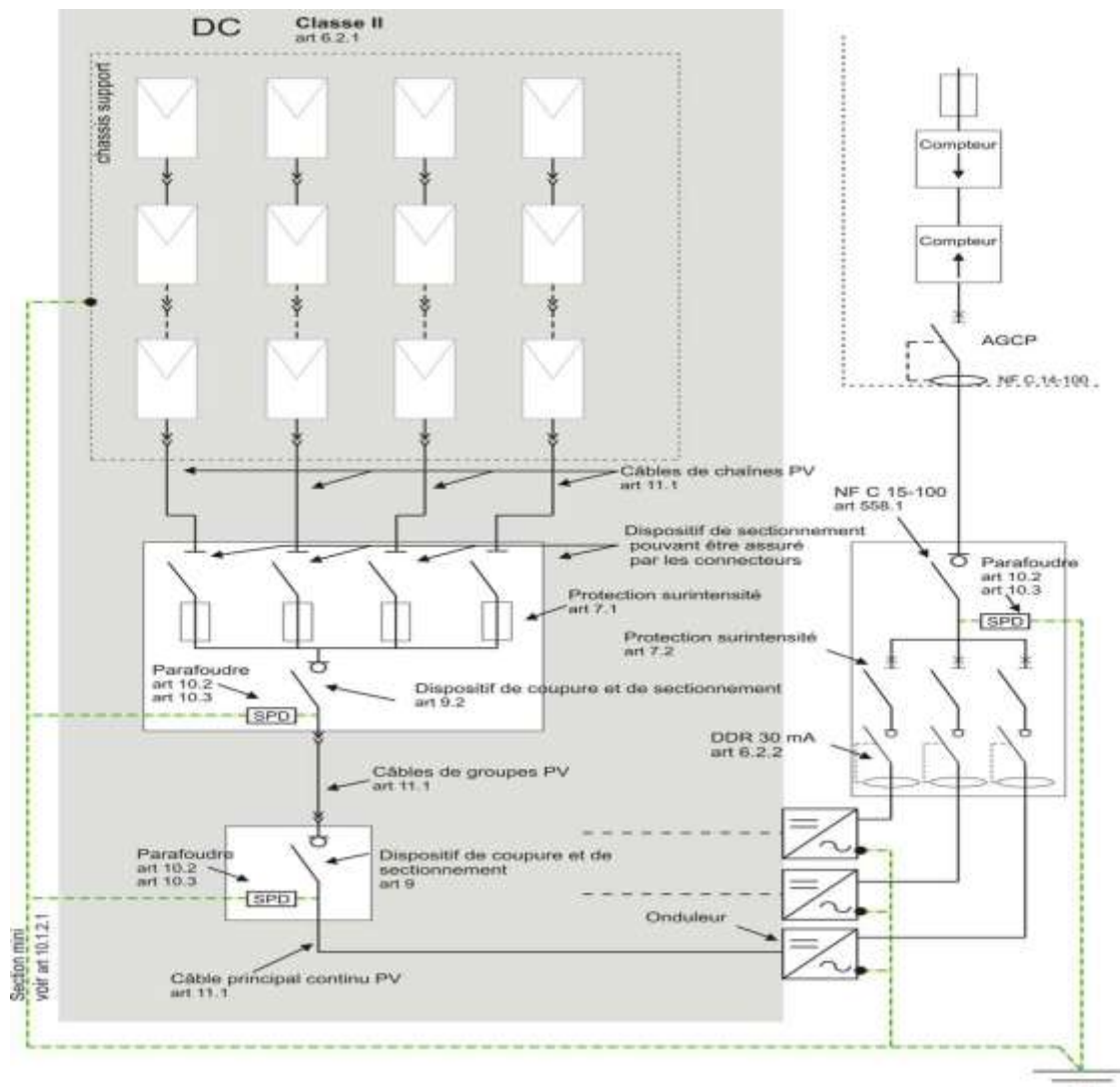


Figure VI-1 – Schéma de principe d'installation PV



### **VI.3 Les différents types d'utilisation de générateur photovoltaïque :**

#### **VI.3.1 ALIMENTATIONS ELECTRIQUES FAIBLES PUISSANCES**

Les alimentations électriques faibles telles que les calculettes ou les chargeurs de piles. Des modules PV peuvent faire fonctionner n'importe quel appareil alimenté par des piles.[19]

#### **VI.3.2 INSTALLATIONS ELECTRIQUES PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOMES :**

En site isolé le champ photovoltaïque peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique en l'absence de soleil[8].

Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques:

Le régulateur de charge a pour fonction principale de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes. Il est un élément essentiel pour la durée de vie de la batterie.

La majorité des populations à l'écart des réseaux électriques vit dans des zones rurales, où l'implantation de tels réseaux est difficile, pour des raisons d'accès ou de moyens. Les systèmes photovoltaïques constituent alors une option intéressante, ils donnent aux populations un accès à l'électricité avec un coût, une maintenance et des difficultés de mise en œuvre réduits [20].

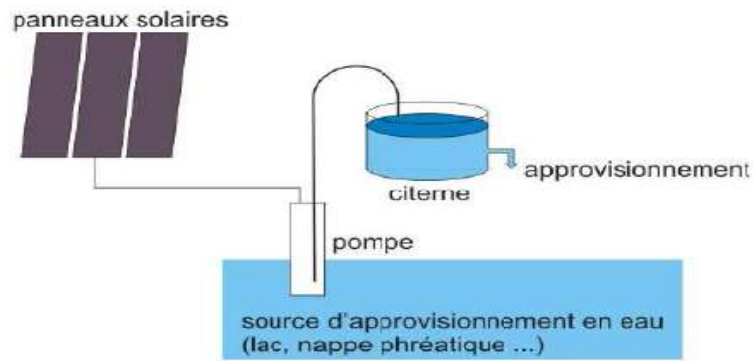


Figure VI-2 : système photovoltaïques autonomes

En site isolé on peut utiliser des récepteurs fonctionnant en courant alternatif. Dans ce cas, l'installation comprendra un onduleur.

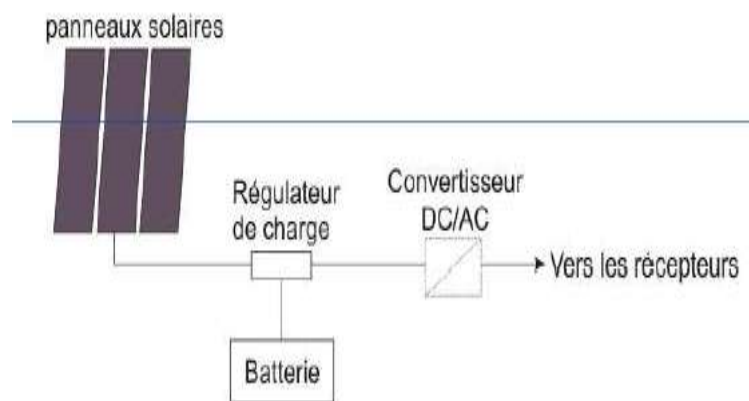


Figure VI-3 : Réglage de système photovoltaïque

### VI.3.3 INSTALLATIONS ELECTRIQUES PHOTOVOLTAÏQUES RACCORDEES AU RESEAU

Lorsque l'installation PV est destinée à être raccordée au réseau de distribution, deux cas sont à considérer :

- installation avec un seul point de branchement,
- installation avec deux points de branchement.

Dans ce dernier cas, l'installation PV ne doit en aucun cas pouvoir être couplée à la partie utilisation de l'installation.

Des exemples de réalisation sont donnés dans les Figures

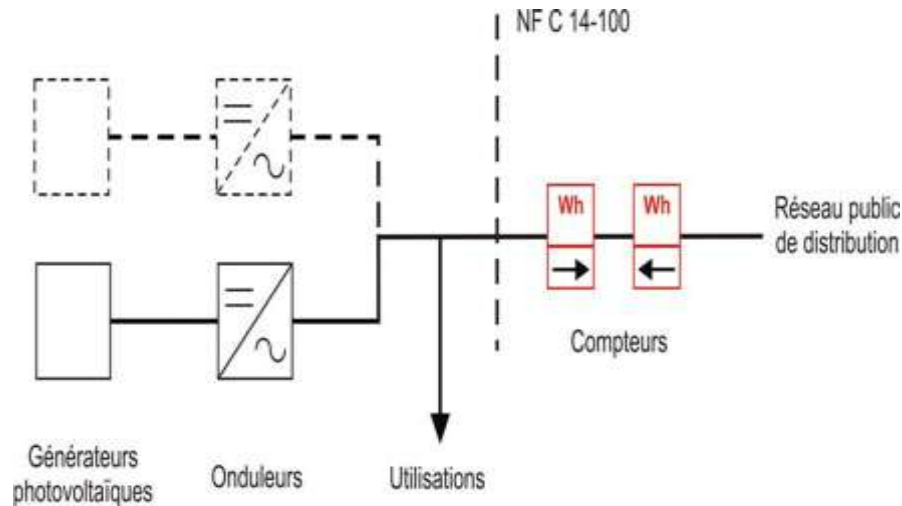


Figure VI- 4: Raccordement en un seul point au réseau public de distribution

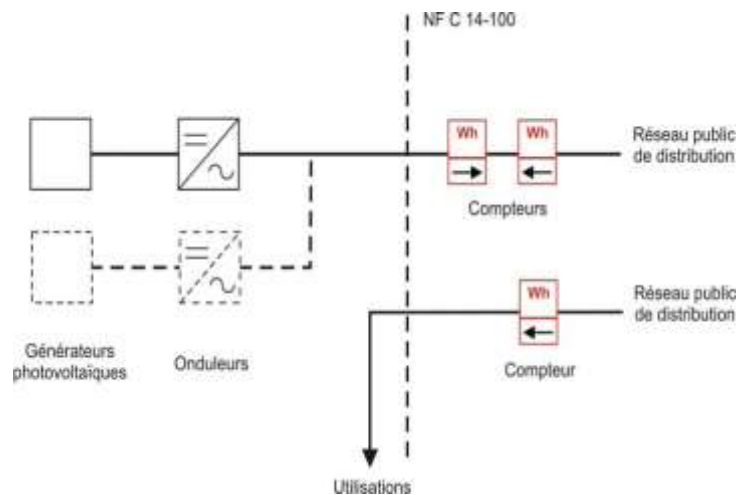


Figure VI-5: Raccordement en deux points au réseau public de distribution

## VI.4: SYSTEME RACCORDE AU RESEAU

### VI.4.1 : PRINCIPE DE RACCORDEMENT

Dans les pays disposant déjà d'un réseau de distribution électrique, une nouvelle pratique a vu le jour dans le courant des années 80.

Elle consiste à compenser les différences entre la production et la consommation grâce à un échange d'énergie avec le réseau. De cette façon, les installations photovoltaïques peuvent se dispenser

d'un système de stockage par batteries et injecter dans le réseau tous les surplus d'énergie produits. Toute injection dans le réseau se traduit par une diminution de la demande sur les centrales hydroélectriques, et donc par une "réserve" d'eau qui pourra être mise à profit pendant la nuit, ou lors de périodes de faible insolation.[17]

Plusieurs centaines d'installations de ce type sont maintenant en service, dont certaines depuis une dizaine d'années, apportant la preuve de la parfaite compatibilité avec le réseau, et de la haute fiabilité de la production d'énergie.

La mise en service de centrales photovoltaïques dans un réseau de distribution électrique élargit le rôle du distributeur. En plus de sa fonction traditionnelle de répartiteur de l'énergie produite par les gros producteurs, le distributeur assure maintenant le rôle de compensateur entre les excédents et les insuffisances de la production d'électricité d'origine solaire.[21]

## **VI.4.2 : composant d'un système photovoltaïque**

### **VI.4.2.1 : Modules**

Le « Module » photovoltaïques (Module PV) est par définition un ensemble de cellules PV associé en série pour générer une tension électrique exploitable lors de son exposition à la lumière.

La fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement. Généralement, elles sont encapsulées sous verre ou sous composé plastique (résine) pour former le module photovoltaïque.[16]

La durée de vie d'un module PV est autour de 20 ans, est normalement indiquée par le fabricant. L'encapsulation est l'un des facteurs influant l'espérance de vie d'un module PV.

Les modules mono et multi-cristallins les plus courants sont composés de 36 cellules disposées en 4 x 9 et depuis quelques années avec l'augmentation de la dimension des centrales photovoltaïques, les constructeurs proposent maintenant des modules composés de plus de cellules, souvent 72 cellules, soit l'équivalent d'un module double.

Les dimensions des modules dépendent de celles des cellules ; actuellement de 125 x 125 mm, avec une tendance vers des cellules plus grandes 156 x156 mm pour les multi-cristallines.[21]

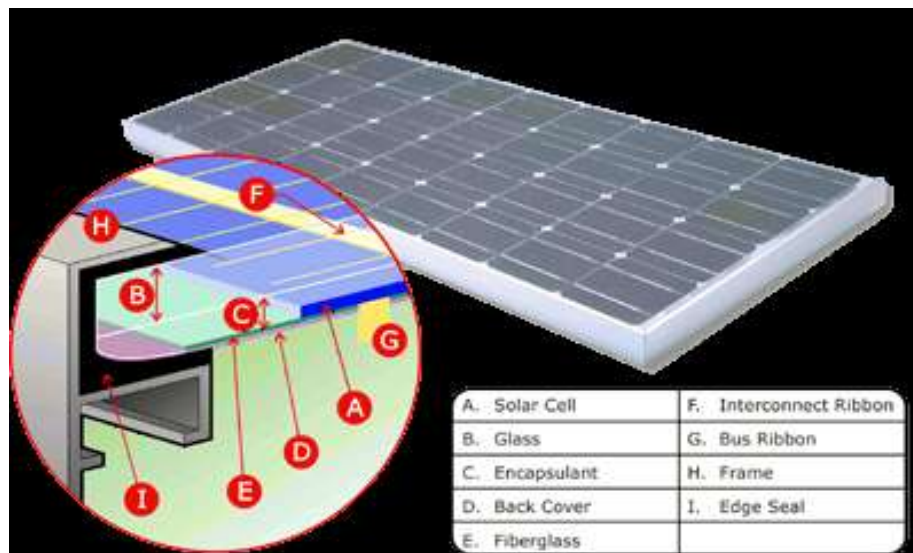


Figure VI-6: module Photovoltaïques

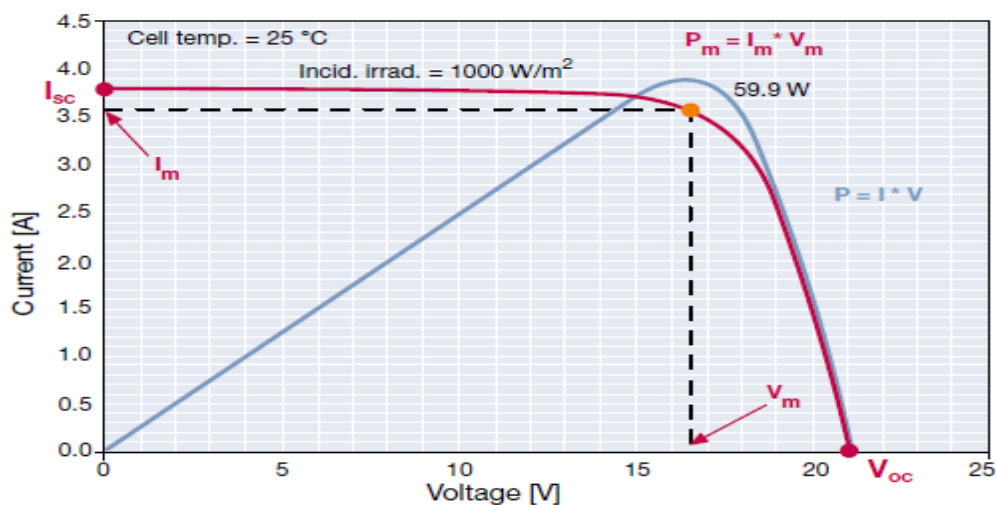


Figure VI-7: Caractéristique courant tension d'un module PV

#### VI.4.2.1.1 Association d'un générateur photovoltaïque.

Dans des conditions d'ensoleillement standard ( $1000\text{W/m}^2$  ;  $25^\circ\text{C}$  ; AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de  $150\text{ cm}^2$  est d'environ  $2.3\text{ Wc}$  sous une tension de  $0.5\text{V}$ . Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires.[22]

**Une association de  $n_s$  cellules en série** permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure

L'équation (3-1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de  $n_s$  cellules.

$$V_{co n} V_{co ns} s = * \text{ avec } n_s I_{cc} = I_{cc} \quad (3-1)$$

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble. Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ( $V_{cons}=0.6\text{V}*36=21.6\text{V}$ ) afin d'obtenir une tension optimale du panneau  $V_{opt}$  proche de celle d'une tension de batterie de  $12\text{V}$ .

Figure . Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série. [17]

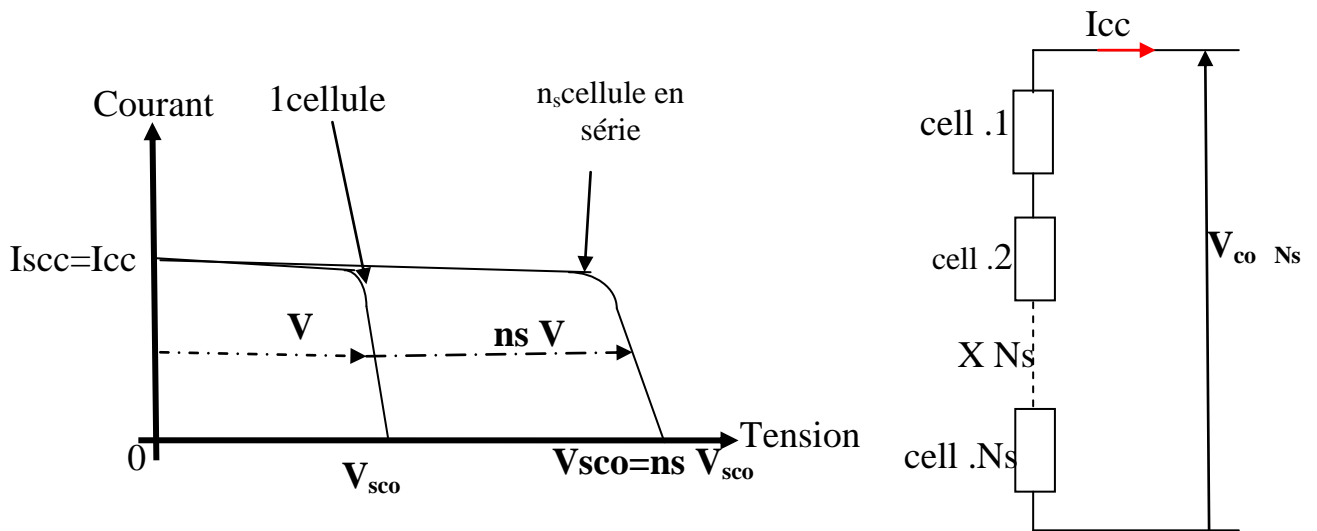
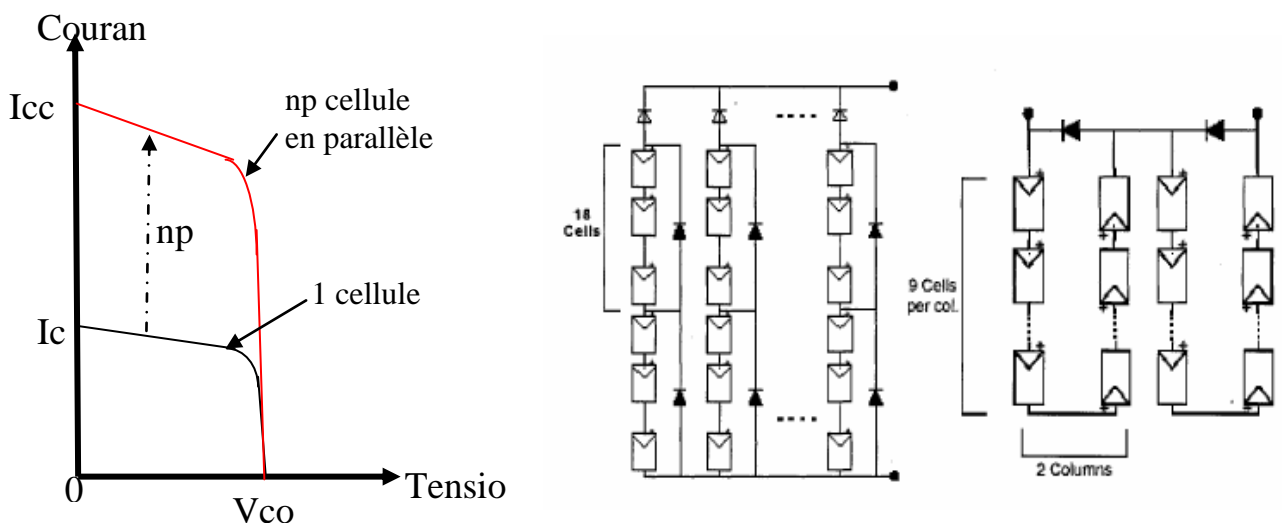


Figure VI-8 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série.

**Association parallèle** de np cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure L'équation (3-2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de np cellules.

$$I_{scnp} = np * I_{sc} \text{ avec } V_{oc_{np}} = V_{oc} \quad (3-2)$$



**Figure VI-9 : Caractéristiques résultant d'un groupement de  $np$  cellules en parallèle**

Le groupement en parallèle permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de  $n$  cellules montées en parallèle, le courant de sortie  $I_s$  a pour expression générale :

**$I_s = n \cdot I$**  avec  $I$  : courant fourni par une cellule

Pour ce groupement, la tension est commune à toutes les cellules

Pour éviter que les cellules ne débitent les unes sur les autres, on ajoute des diodes anti-retour.

#### **VI.4.2.1.2 Caractéristiques d'un module :**

Voici la description des paramètres d'un module :

**La puissance crête  $P_C$**  : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans la condition standard ( $25^\circ\text{C}$  et un éclairement de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

**La caractéristique  $I(V)$**  : courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci .

**Tension à vide  $V_{co}$**  : tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».

**Courant de court circuit  $I_{cc}$**  : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement « plein soleil ».

**Point de fonctionnement optimum ( $U_m, I_m$ )** : lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil »,  $P_m = U_m \cdot I_m$  .

**Rendement maximal** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

**Facteur de forme** : rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance de radiation incidente.



### VI.2.2 LE PANNEAU PHOTOVOLTAIQUE :

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en série (augmenté la tension) et en parallèle (augmenté le courant) pour former un panneau (ou champ PV).

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants du panneau PV dépend :

- Des besoins en électricité
- De la taille du panneau
- De l'ensoleillement du lieu d'utilisateur
- De la saison d'utilisateur

### VI.4.2.3 Les Batteries :

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite s'envisager des stockages suivant les conceptions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales:

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

**Les Caractéristiques principales d'une batterie sont :**

**Capacité en Ampère heure :** Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que :

**Rapports de chargement et déchargement** : Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

- **Température** : Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.

**La durée de vie** : Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année ( ou en nombre de cycles).

**Profondeur de décharge**: La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel-

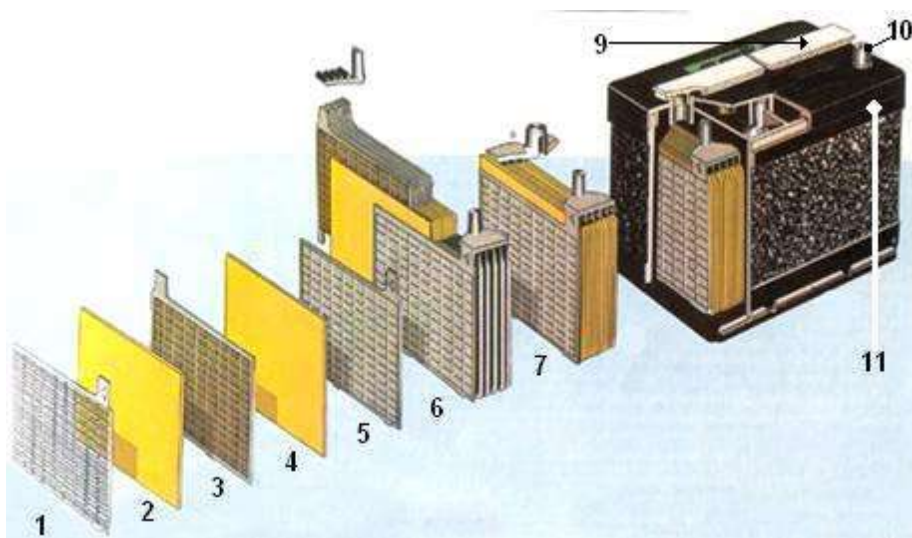
Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucuns dommages.

**La profondeur de décharge** : Cependant, affecte même les batteries de cycle profond. Plus la décharge est grande plus la durée de vie de la batterie est réduite.

**La tension d'utilisation** : C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

**Le rendement** : C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

**Le taux d'autodécharge** : L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.



*Figure VI-10: Construction d'une batterie monobloc*

1: Grille.

2 : Séparateur.

3 : Plaque positive.

4 : Plaque négative.

5 : Barrette.

6 : Faisceau négatif

7 : Élément complet

8 : Pont

9 : Rampe de bouchons.

10 : Borne.

11 : Bac.

#### VI.4.2.4 Système de régulation :

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge d'une batterie afin d'en maximiser la durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.[21]

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- la protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes.
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ PV à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appliquera le régulateur pour assurer sa fonction. Le régulateur mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension pré-régler : seuil haut et seuil bas.

Il existe plusieurs types de régulateurs :

##### VI.4.2.4.1 Régulation de décharge

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré-régler bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête de décharge lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil.

#### VI.4.2.4.2 Régulation de la charge

La régulation de la charge effectuée par une réduction de courant lorsque la batterie est chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge.

Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries au plomb :

- Régulations de charge série
- Régulateur de charge de coupure
- Régulateur de charge à découpage
- Régulateur de charge série à coupure partielle
- Régulateur de charge parallèle [19]

#### VI.4.2.5 Système de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, il portera le nom de Convertisseur continu continue), soit entre la batterie et la charge (il sera alors appelé onduleur ou convertisseur continu alternatif).

A l'onduleur est généralement associé un redresseur qui réalise la transformation du courant alternatif en courant continu et dont le rôle sera de charger les batteries et d'alimenter le circuit en continu de l'installation en cas de longue période sans soleil.[23]

##### VI.4.2.5.1 Le convertisseur continu -continu :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. [23]

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95%. Ce système présente deux inconvénients pour un PV de faible puissance :

- Prix élevé.

- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension) n'est pas important.[24]

#### VI.4.2.5.2 Le convertisseur continu- alternatif :

C'est un dispositif destiné à convertir le courant continu en courant alternatif. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Rotatif** : c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1kW jusqu'à atteindre 90% pour 50kW. Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité. Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

- **Statique** : on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes a vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliorés à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. Avec ce système, on obtient :

- Un rendement élevé sur une plage du taux de charge.
- De faibles pertes à vide.

Les onduleurs pour la connexion au réseau ont une puissance nominale d'environ 100 W à plusieurs centaines de kW. Jusqu'à 5 kW, ils fonctionnent en général en 230 V monophasé, alors qu'au-dessus, ils doivent être triphasés (basse ou moyenne tension). Etant connecté directement sur le champ PV, leur tension et leur courant d'entrée sont donc très variables avec les conditions d'ensoleillement et de température ambiante. L'une des fonctions importantes de l'onduleur réseau est donc la recherche du point de puissance maximum (souvent notée MPPT pour « Maximum Power Point Tracking »),

c'est-à-dire adaptation permanente de l'impédance d'entrée afin d'optimiser, à chaque instant, le produit  $P = U \cdot I$  sur la caractéristique du champ PV. L'onduleur doit ensuite construire une (ou trois) tension(s) sinusoïdale(s) correspondant aux normes requises par le réseau.

Il existe trois concepts différents pour un onduleur PV connecté au réseau :

- **L'onduleur central**, principal concept utilisé ; c'est de lui que nous parlons dans la suite. La totalité de la puissance DC est transformée en puissance AC à l'aide d'un ou plusieurs onduleurs centraux. Les avantages sont la séparation claire entre les parties DC et AC ainsi qu'une maintenance simplifiée. Les désavantages sont une influence importante des ombrages partiels, ce qui demande un MPPT (Maximum Power Point Tracker) plus complexe. Les systèmes à onduleur central se présentent selon deux configurations possibles : un onduleur unique ou plusieurs onduleurs couplés en maître-esclave. Ce dernier concept permet d'optimiser le nombre d'onduleurs en fonction de la puissance à transformer ; ainsi chaque onduleur travaille à un niveau de puissance pour lequel son rendement est le plus élevé. Un désavantage est que l'onduleur maître est toujours fortement sollicité, accroissant ainsi son risque de panne.[6]
- **Un onduleur de branche** monté sur chaque branche de panneaux PV. Ce concept permet d'économiser les boîtiers de répartition et simplifie partie du câblage DC. Les onduleurs de petites dimensions peuvent être montés sur un canal de distribution, ce qui facilite leur accès et leur contrôle. Ce concept tend à devenir le standard en Allemagne dans les systèmes domestiques de moyenne puissance.
- **Aux Pays-Bas**, une recherche intense s'est développée autour du concept de l'onduleur de module ou "module-AC". L'onduleur est monté directement sur le module à côté de la boîte à bornes. Il permet un câblage simplifié en AC uniquement, une connexion simplifiée à l'habitation et le

système est moins sensible aux ombrages partiels puisque chaque module est branché en parallèle avec son voisin. Un autre avantage important de ce concept est que le module AC ne débite du courant que s'il voit la sinusoïde du réseau : pour les installateurs, le souci permanent de s'électrocuter disparaît. C'est encore une technologie récente sur laquelle le retour d'expérience est très jeune, en particulier sur la durée de vie, la fiabilité et la résistance aux surcharges.

En général, en dessous de 3.5 kW, les onduleurs fonctionnent en 230 V monophasé. Cette valeur est alignée sur les normes en vigueur mais typiquement on peut considérer le seuil à 5 kW. Pour des systèmes de dimension supérieure (5 à 10 kW), l'alimentation peut utiliser un onduleur triphasé ou trois onduleurs monophasés.

L'avantage du triphasé est son alimentation symétrique, idéale pour les réseaux faibles et le fait qu'un seul appareil est nécessaire. Les inconvénients sont qu'il ne peut y avoir qu'un seul champ de modules et qu'il n'y a pas de modèles de petite puissance disponible.

Les avantages du triple monophasé sont le choix important de fournisseurs pour les petites et moyennes puissances et qu'il permet la présence de trois champs de modules différents. Ses inconvénients sont que les champs asymétriques entraînent une alimentation déséquilibrée du secteur et surtout la sommation des harmoniques impairs dans la connexion neutre-réseau qui nécessite une liaison à très basse impédance.

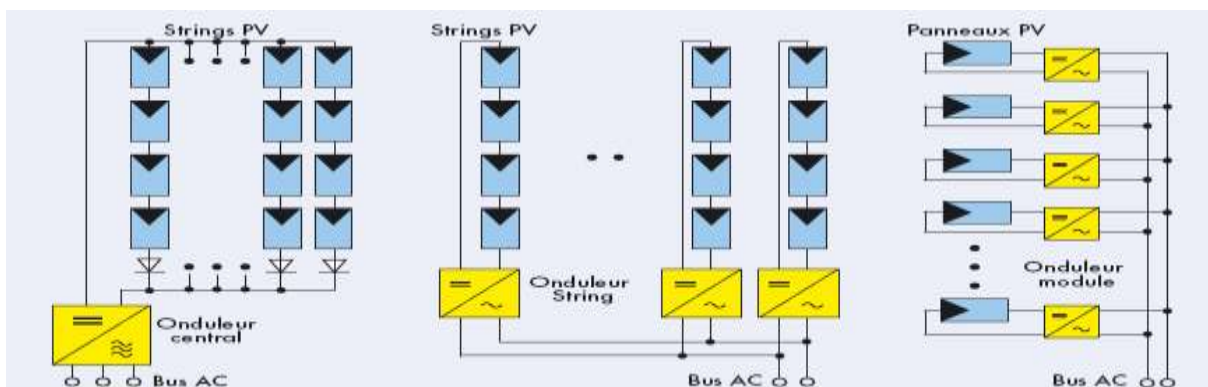


Figure VI-11 : Configurations des onduleurs connectés au réseau



### VI.4.2.5.3 Impératifs techniques

Les impératifs techniques suivants doivent être satisfaits:

- une parfaite synchronisation avec le réseau. Il existe deux types de synchronisation, les onduleurs pilotés par le réseau (le plus courant), et ceux à référence sinusoïdale interne (rare)
- déclenchement automatique en cas de coupure du réseau (pas de fonctionnement en îlot)
- limitation de la tension de sortie à la valeur maximale admissible pour le réseau ;

Raccordement au réseau Eléments d'une installation

- ne pas occasionner de déphasage important ;
- faible taux de fréquences harmoniques (signal proche de la sinusoïde) ;
- faibles perturbations électromagnétiques (hautes fréquences) ;
- insensibilité aux signaux de commande du réseau ;
- isolation galvanique (entre le champ et le réseau) est souhaitable.

D'autres qualités sont à surveiller lors du choix d'un onduleur :

- le rendement, au niveau de puissance usuelle de l'installation, doit être élevé
- enclenchement et déclenchement automatiques, avec un seuil d'irradiance faible
- qualité et précision de la recherche du point de puissance maximum ;
- plage d'entrée en tension ; elle conditionne le nombre de panneaux à connecter en série dans le champ
- comportement à puissance maximale : certains appareils se déconnectent, d'autres continuent de fonctionner en limitant la puissance ;
- protection en température ;
- consommation faible (nulle) sur le réseau durant la nuit ;
- affichage des paramètres de fonctionnement et des pannes; possibilités de contrôle par ordinateur extérieur ;
- fiabilité, l'un des points cruciaux jusqu'à aujourd'hui ;

- encombrement et poids raisonnables ;[18]

## VI.5 LA PROTECTION ELECTRIQUE DES INSTALLATIONS PV

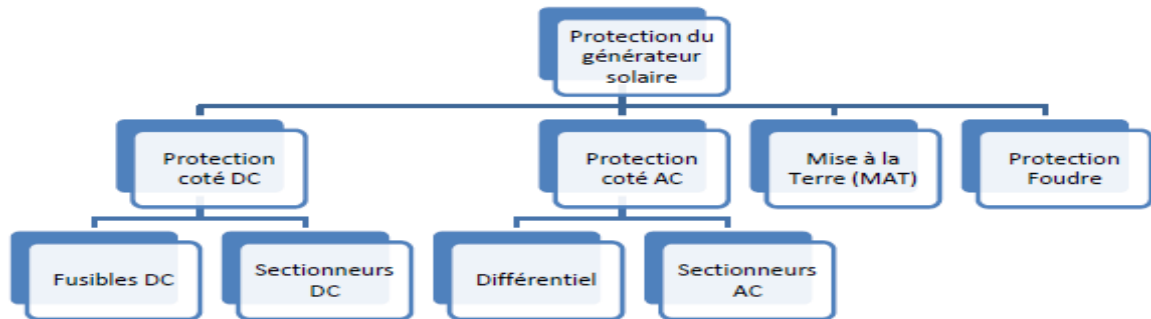


Figure VI-12: diagramme de La protection électrique des installations PV

### VI.5.1 LES PROTECTIONS COTE AC :

#### VI.5.1.1 protection de découplage :

Lorsqu'une installation de production photovoltaïque est couplée au réseau, une protection de découplage est nécessaire.

Cette protection est destinée à la déconnexion de l'installation en cas de :

- défaut sur le réseau ;
- absence de tension sur le réseau ;
- variation de tension ou de fréquence en dehors de la plage de fluctuation tolérée par le réseau.

Cette protection est intégrée à un dispositif de coupure automatique ou à l'onduleur.

### VI.5.2 PROTECTION CONTRE LES SURINTENSITES :

Afin de protéger les conducteurs constituant l'installation électrique, des fusibles ou des disjoncteurs sont utilisés pour éviter tout échauffement excessive lors du passage du courant.

Les surintensités peuvent se présentés sous deux formes :

**VI.5.2.1 COURANTS DE SURCHARGE :**

Un dispositif de protection contre les courant de surcharge doit être prévu afin d'éviter tout échauffements excessives provoquant des problèmes d'isolation

Le choix des dispositifs de protections ainsi que l'emplacement des dispositifs de protection contre les surcharges.

**VI.5.2.2 COURANT DE COURTS CIRCUITS :**

Il doit être disposée sur chacun des conducteurs actifs, a part le neutre afin d'interrompre tout courant de court-circuit avant que celui-ci ne puisse devenir dangereux a cause des effets thermiques dans les conducteurs.

Cette fonction est assurée soit par des disjoncteurs ou bien par des fusibles, les pouvoirs de coupure de ces dispositifs de protections est déterminée en tenant compte des courants de courts circuits maximaux provenant du réseau.

La détermination des courants ainsi que l'emplacement des dispositifs de protection contre les courts circuits.

**VI.5.3 DISPOSITIFS DE SECTIONNEMENT ET DE COUPURE :****a/Dispositif de coupure :**

Afin d'assurer l'isolement de l'onduleur en cas de défaut sur le réseau, ou bien lors d'une opération de maintenance, un interrupteur ou disjoncteur doit être installer à la sortie de l'onduleur, ces derniers permettent la coupure de l'onduleur en cas d'intervention sans nécessité d'intervenir au niveau de disjoncteur ligne (point d'injection sur le réseau),ainsi de couper l'alimentation en cas de défaut.

**b /Dispositif de sectionnement :**

Un dispositif de sectionnement doit être installé en aval de l'onduleur afin d'assurer une isolation en cas de maintenance, tout le circuit doit pouvoir être sectionné sur chacun des conducteurs actifs a l'exception du conducteur PE.

#### VI.6.4 MISE A LA TERRE :

Afin d'assurer une protection des équipements et des personnes, et pour faire circuler les courants de défaut et de fuite à la terre sans aucun danger, une mise à la terre de tous les équipements (carcasse métallique), doit être prévu.

Le réseau de terre doit être maillé et bouclé pour avoir une équipotent alité dans toute l'installation, réduire la résistance de la prise de terre et ne pas créer des surtensions local lorsque il transporte un défaut.

#### VI.6.5 PROTECTION CONTRE LES SURTENSIONS

Dans une installation photovoltaïque, les surtensions peuvent survenir :

- Du réseau qui peuvent être d'origine atmosphérique (foudre) ou dues à des manœuvres.
- Des coups de foudre à proximité de l'installation ou par des variations du champ électrique générer par ces derniers.

A cet effet, dans une installation PV un dispositif de protection contre les surtensions est nécessaire (Parafoudres et Paratonnerres)

Dans la fonction de protection contre les surtensions, on distingue deux types de protection contre la foudre à savoir :

##### 1. Protection contre la foudre extérieur :

Son principe est de capter la décharge atmosphérique et de la drainer vers le sol à travers un dispositif de captage relié directement à la terre (paratonnerres).

##### 2. Protection contre la foudre intérieur

Elle permet de crée une liaison équipotentiel entre les parties métallique de l'installation et les lignes électriques.

Cette dernière est raccordée indirectement, à la terre à travers une protection contre les surtensions (parafoudres).

**VI.6.6 PROTECTION DIFFERENTIELLE :**

Les dispositifs de protection différentiels à courant résiduel (DR) ont été conçus pour assurer une protection des personnes contre les contacts indirects et une protection complémentaire contre les contacts directs (haute sensibilité).

Cette protection peut être intégrée directement avec les protections de l'onduleur en cas où l'installation photovoltaïque ne possède pas un transformateur d'évacuation.

**III.5 MODALISATION LE SYSTEME PV RACCORDE AU RESEAU**

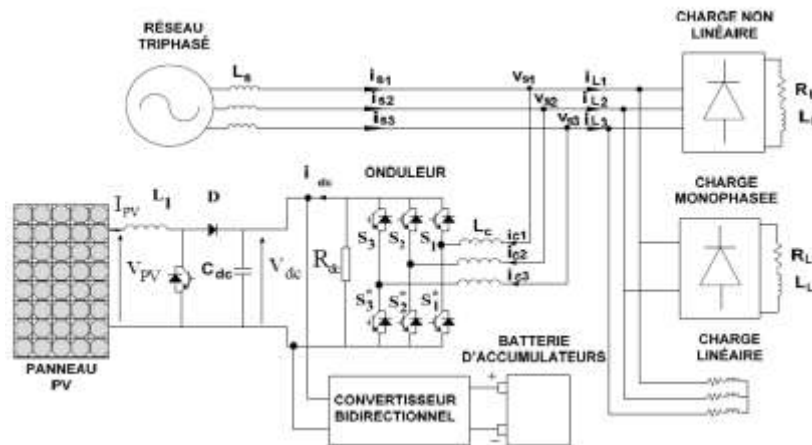


Figure VI.13 : Schéma global du système PV raccordé au réseau

**VI.7.1 MODALISATION ET SIMULATION LES COMPOSANT DE SYSTEME**

**VI.7.1.1 MODELE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE**

Le modèle utilisé est défini par une source de courant idéal associée à une diode [ D ] et à 2 résistances [  $R_s$  ] et [  $R_p$  ]. La diode [D] décrit les propriétés semi-conductrices de la cellule photovoltaïque (modélisation du comportement de la cellule dans l'obscurité). La résistance [  $R_s$  ], résistance série, modélise les pertes ohmiques du matériau. La résistance [  $R_p$  ], résistance shunt, modélise les courants parasites qui traversent la cellule [22]

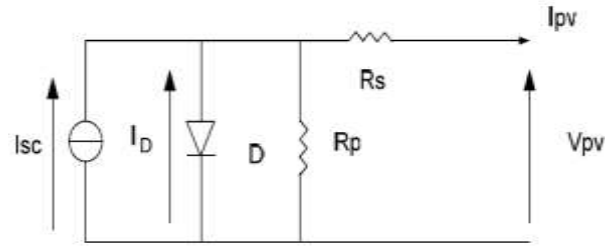


Figure VI.14 : Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle

Pour modéliser la cellule, on exprime les grandeurs électriques relative à la représentation de la cellule sous forme d'équation, tel que, pour le courant circulant dans la diode :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) = I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{V_T}} - 1 \right)$$

$I_0$  étant le courant de polarisation inverse de saturation de la diode

Avec :

$$V_D = V_{pv} + R_S I_{pv}$$

Et  $V_T$  étant la tension thermique défini par :

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

Avec k la constante de Boltzmanégál à  $1.3806503 \times 10^{-23}$  J/K, T est la température de fonctionnement de la cellule en degré Kelvin, et q est la charge d'électrons.

La tension  $V_{pv}$  est donc définit par :

$$V_{pv} = V_D - R_S I_{pv}$$

Et

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{R_p}$$

On obtient alors l'expression de  $I_{pv}$  pour une cellule :

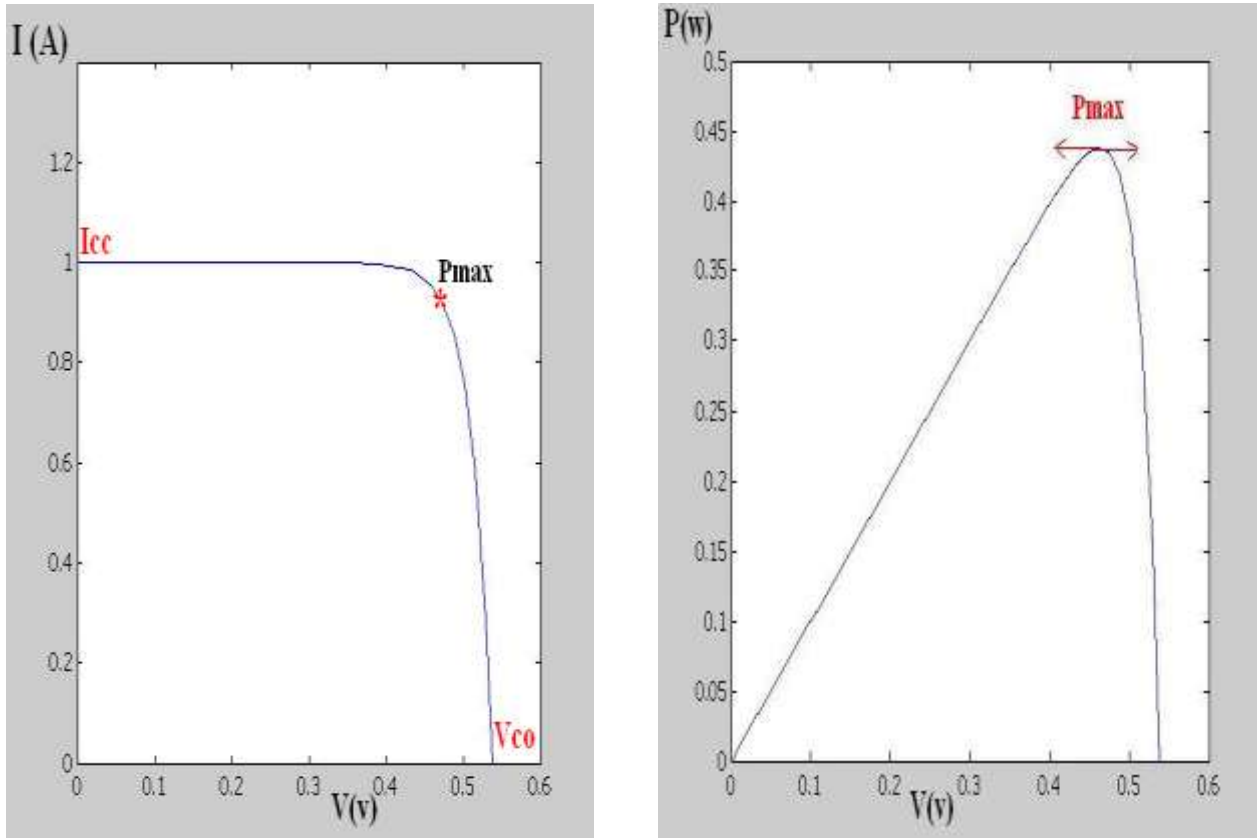
$$I_{pv} = I_{sc} - I_D - I_p = I_{sc} - I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} - \frac{R_S}{R_p} I_{pv}$$

Si on pose  $N_s$ , le nombre de modules connectés en série dans une branche et  $N_p$ , le nombre de branches connectées en parallèle.[22]

L'équation régissant ce modèle de générateur photovoltaïque est obtenue à partir de l'équation

$$I_{pv} = N_p I_{sc} - N_p I_0 \left( e^{\frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{N_s V_T} + \frac{R_S I_{pv}}{N_p V_T}} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} - \frac{R_S}{R_p} I_{pv}$$

**VI.7.1.1 Simulation de composent**



.Figure VI.15.a Caractéristique I=f(V) de la cellule Figure VI.16 Caractéristique P=f(V) de la Cellule

D'après ces résultats de simulation, on peut constater que cette cellule à :

- Courant de court-circuit Icc = 1 A.
- Tension de circuit ouvert Vco= 0.54 v.
- Puissance maximale Pm = 0.44 w

On cherche à obtenir les caractéristiques du module PV I=f(V) et P=f(V) suivantes: Icc=4.8 A ,Vco=21.7V , Vm=17V Pmax=75W

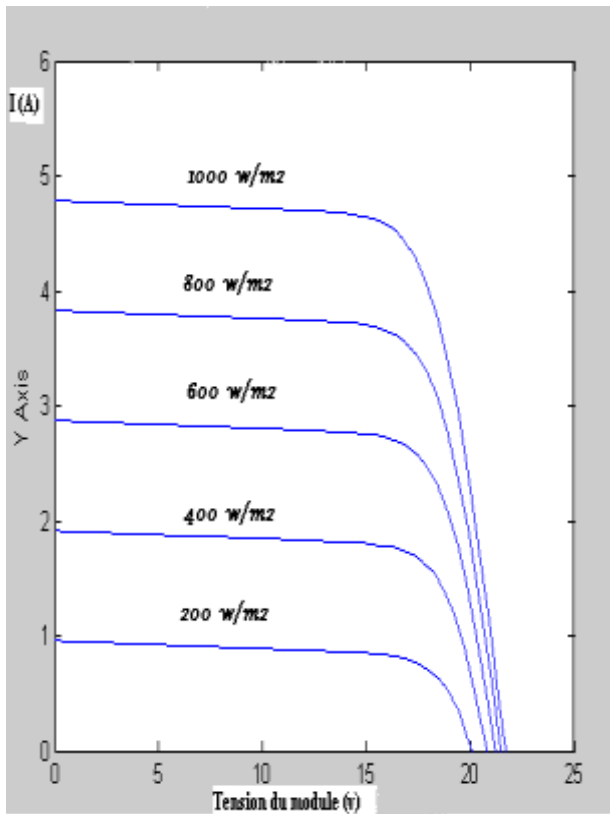


Figure –VI-17 Courbe I(V) du module

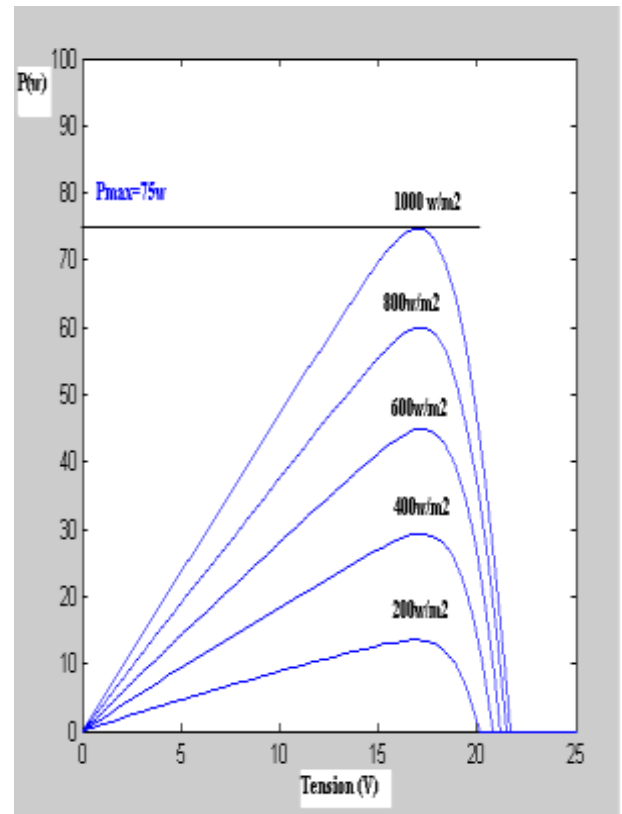


Figure VI-18 Courbe P(V) du module

En utilisé différents panneaux (série / parallèle)

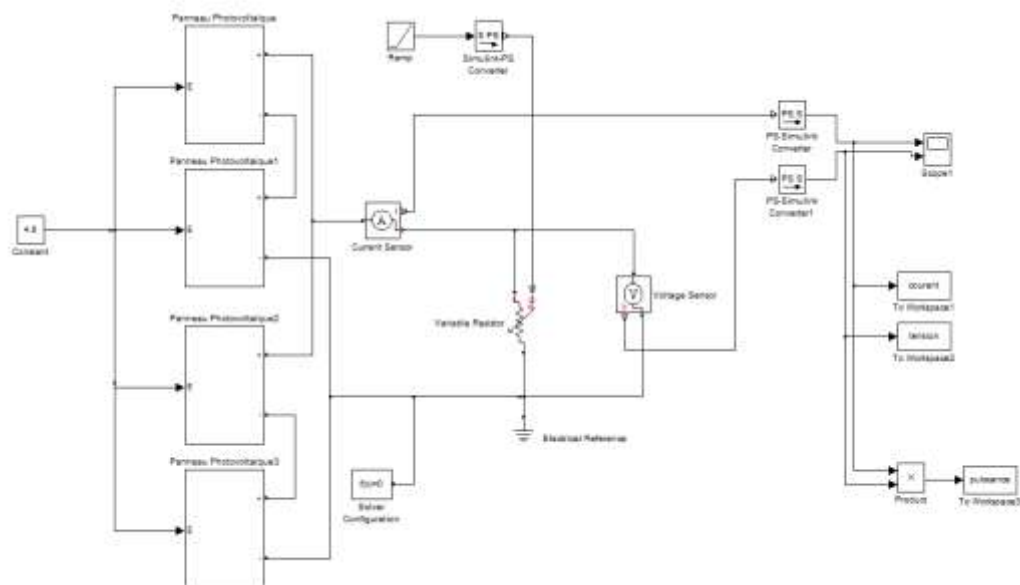


Figure VI-19 Différents panneaux (série / parallèle)



Paramétrer la valeur du bloc constant a 4.8 (correspond a une irradiance de 1000W/m2

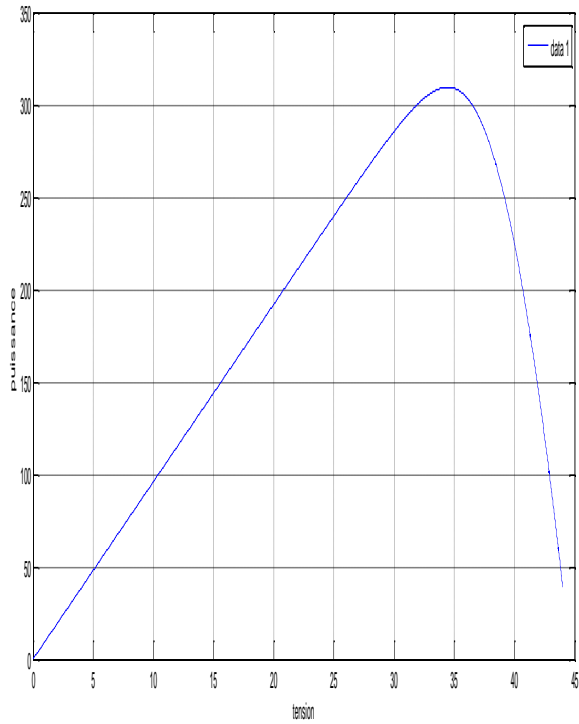


Figure VI -20 caractéristique  $P=f(I)$

$P_m$  309,5  
 $V = 44$  v

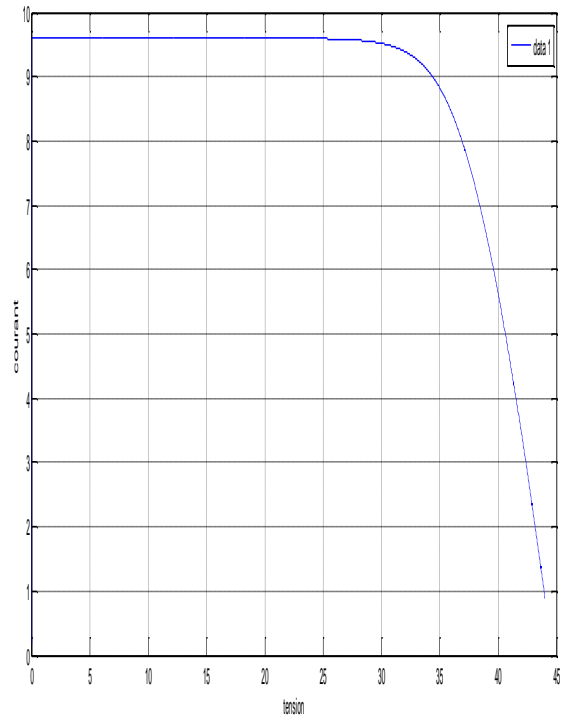


Figure VI -21 caractéristique  $I=f(U)$

$I_m$  9,6  
 $V = 44$  v

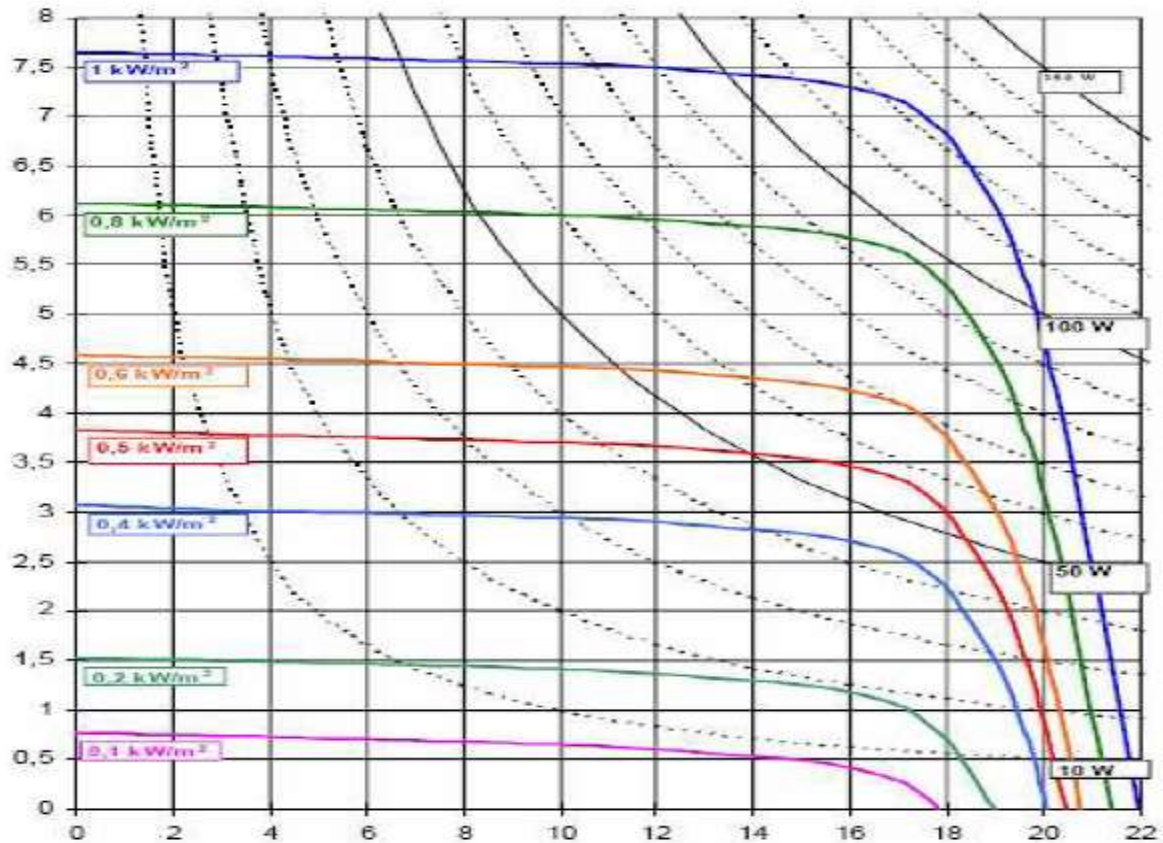


Figure VI-22 : Caractéristiques I-U d'un module Photo watt PW 6-110 pour différentes Irradiations solaires, à 25 °C [6].

### VI.7.1.2 Modélisation de la commande MLI

Dans le cas de la commande MLI on fait varier l'état de l'interrupteur à une cadence qui ne dépend pas de la manière dont évoluent les grandeurs relatives aux systèmes interconnectés par le convertisseur électronique de puissance, cette cadence étant fixée essentiellement en fonction de la vitesse de commutation de l'interrupteur. Sous forme numérique ce type de commande est réalisé en fixant à l'aide de « timers » les intervalles de conduction des différents interrupteurs sur chaque période ou chaque demi-période de modulation, comme le montre la figure suivante. [19]

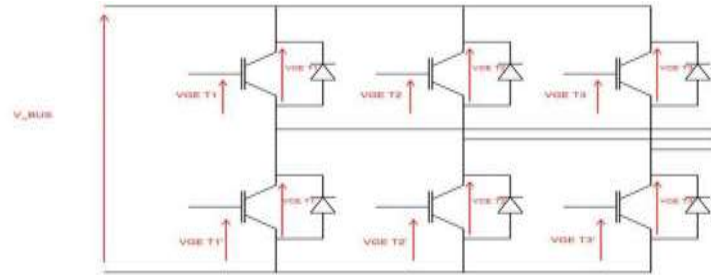


Figure VI-23 : Schéma de L'onduleur

Les vecteurs de tensions sont représentés par la relation suivante

$$\vec{V}_i = \begin{cases} \sqrt{2/3}U_{dc} e^{j(i-1)\frac{\pi}{3}} & i = 1, \dots, 6 \\ 0 & i = 0, 7 \end{cases}$$

Commande MLI vectorielle d'un onduleur triphasé

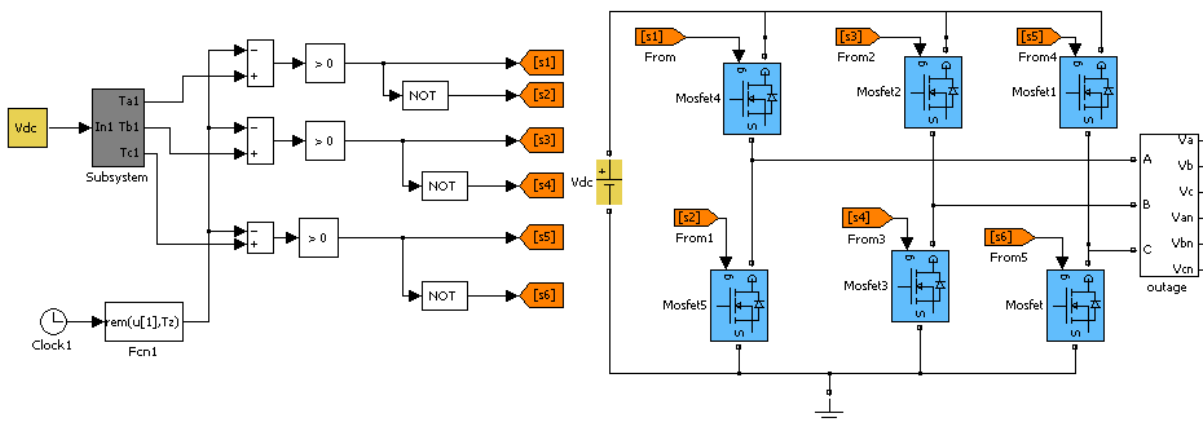


Figure VI.24 : Bloc SIMULINK de MLI vectorielle

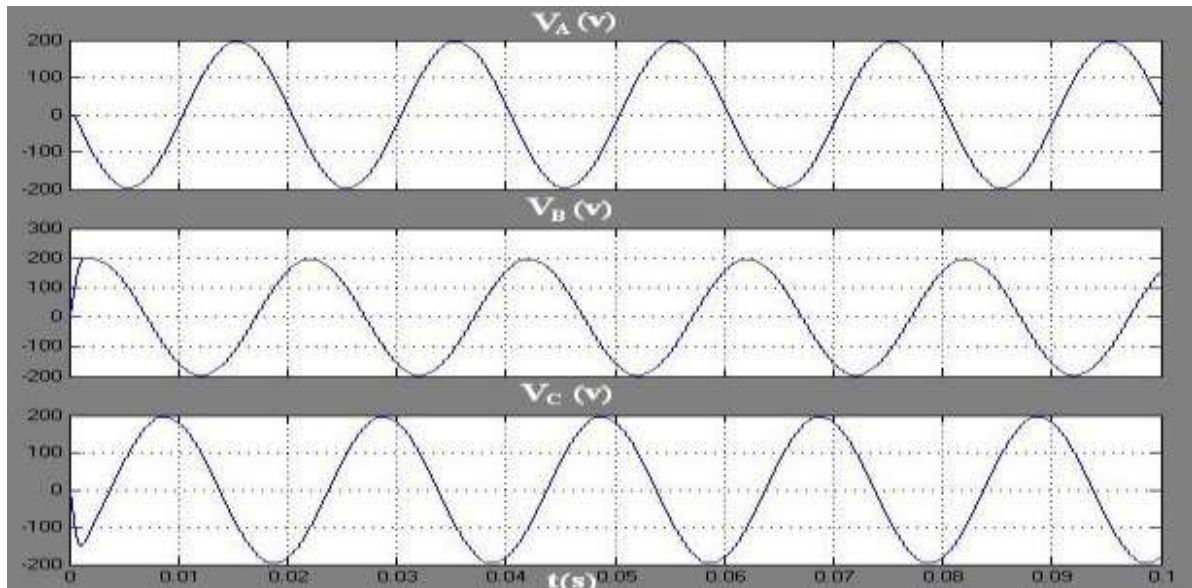


Figure VI.25 : Les tensions filtrées :  $V_A, V_B, V_C$

Chacun des couples de vecteurs  $V_i$  et  $V_{i+1}$  ( $i=1..6$ ) définissent les limites d'un des six secteurs de l'hexagone (à noter que dans le secteur 6 la notation  $V_{i+1}$  correspond au vecteur  $V_1$ ).

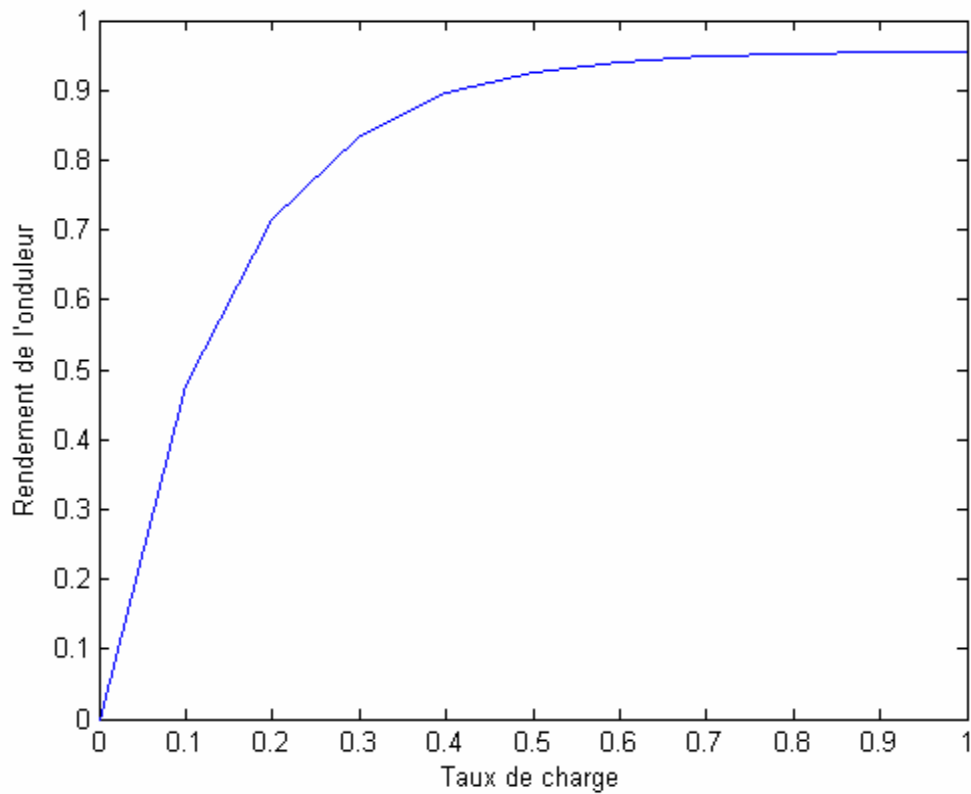


Figure VI-26 : Rendement de l'onduleur [6]

## VI.8 CONCLUSION

La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet a été élaborée à partir de modèles de la littérature (champ PV, convertisseurs, stockage batteries) ; cette modélisation est une étape essentielle permet d'introduire un certain nombre de modèles puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que ses paramètres constitutifs.

L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres. L'outil ainsi réalisé sera utilisé pour déterminer le dimensionnement optimal d'un tel système. L'étude reste incomplète ce qui nécessite de faire un bon dimensionnement.

### 4- Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique

Les systèmes photovoltaïques à injection dans le réseau, fonctionnent selon le principe de la conversion instantanée de l'énergie solaire en électricité et son injection directe dans le réseau électrique. Les éléments qui constituent ces systèmes sont :

- le générateur photovoltaïque qui a pour fonction de convertir l'énergie solaire en un courant électrique, il est constitué d'un ensemble de modules photovoltaïques montés en séries ou parallèles selon la configuration désirée. Chaque module regroupe un ensemble de cellules solaires, généralement montées en série. Les paramètres électriques qui caractérisent cette configuration sont : la tension, le courant, la puissance et l'énergie.
- le convertisseur DC/AC, a pour fonction de convertir le courant continu en un courant alternatif, avant de l'injecter dans le réseau électrique. Les paramètres électriques du convertisseur DC/AC, doivent être adaptés à ceux du générateur photovoltaïque,

- les compteurs d'énergie électrique gèrent le flux d'énergie entre le système photovoltaïque, le réseau électrique et les charges domestiques. Dans certaines configurations (Fig. III.1), le compteur 1, comptabilise la quantité d'énergie injectée dans le réseau et le compteur 2, l'énergie prélevée sur le réseau électrique. A la fin de l'année un bilan est établi pour la facturation. Dans des cas particuliers, un groupe de secours, constitué d'une batterie et d'un convertisseur, a pour rôle de fournir de l'énergie, lors d'une rupture de l'alimentation des charges, par le réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques autonomes, destinés à des applications sur des sites isolés, présentent des configurations différentes de celles décrites ci-dessus. Ces systèmes ne font pas l'objet de ces travaux de recherche.

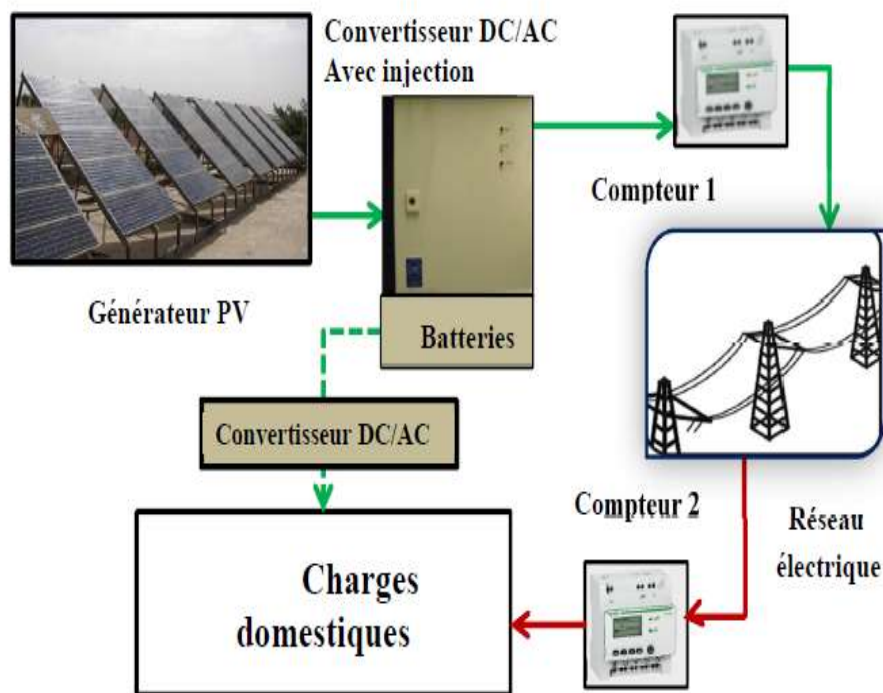


Figure VI-27 Schéma synoptique d'un photovoltaïque avec injection dans le réseau

## CONCLUSION

Le travail présenté dans ce mémoire concerne les systèmes PV couplé au réseau électrique. ce dispositif est amené à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyennes de production et d'un meilleur respect de l'environnement associées à une production centralisée, ces petites ou moyennes unités peuvent permettre une mutualisation avantageuse de ressources très réparties, très fluctuantes, et contexte de développement durable.

Les études sur le couplage entre PV et d'autres sources d'énergie ont débuté en 2000 et ont porté sur la conception et la réalisation de générateurs d'énergie connectés aux réseaux. L'accent a été toujours mis sur le caractère modulaire. Lieu concernait les réseaux électriques autonomes, le caractère approché permet aujourd'hui de projeter les résultats obtenus vers des systèmes connectés à des réseaux centralisés.

Dans cette étude ressort l'importance de la modélisation de la connexion au réseau électrique et de son ou ces systèmes de production. La commande de l'onduleur et les systèmes de production déterminent le comportement principal de la production décentralisée sur le réseau basse tension. Les technologies actuelles permettent une souplesse de commande importante et même de s'adapter aux défauts des réseaux et ainsi de ne pas être déconnectée des réseaux. Pour les systèmes PV, la souplesse de utilisation des convertisseurs statique est sous employée, il serait intéressant d'étudier dans quelle mesure les limites d'une déconnexion du réseau peuvent être repoussées.





# ***CONCLUSION GENERALE***

## **Conclusion**

Passer à un autre mode de consommation énergétique devient évident et surtout inévitable. Profiter des avancées de plusieurs secteurs (celui des capteurs, des télécommunications et des technologies de l'information) pour fournir un système de gestion de l'électricité plus efficace et moins énergivore est salutaire. Gérer en temps réel des flux d'électricité et d'information dans les deux sens et gérer des centrales à la production très fluctuante, tels sont les deux défis que les réseaux devront relever en se criblant d'électronique.

Les réseaux intelligents sont notre seule chance de conserver notre rythme de consommation électrique actuelle. Plus réactifs et communicants, ils permettront de répondre aux défis que constituent l'intégration de la production électrique d'origine renouvelable, la maîtrise de la demande énergétique, la gestion des pics de consommation et le développement de l'usage de la voiture électrique.

On notera enfin que l'émergence des réseaux intelligents est accentuée par l'évolution des logiques législatives introduites par l'ouverture des marchés de fourniture d'électricité à la concurrence.

## REFERANCE BEBLIOGRAPHIQUES :

- [1] [http://www.alquds.co.uk/?page\\_id=20894/](http://www.alquds.co.uk/?page_id=20894/)
- [2] <http://www.baosem.com/v4/fr/article.php?id=2912/>
- [3] [http://www.leconews.com/fr/actualites/nationale/energie/plus-decentrales-hydroelectriques-en-algerie-09-07-2014-170519\\_289.php](http://www.leconews.com/fr/actualites/nationale/energie/plus-decentrales-hydroelectriques-en-algerie-09-07-2014-170519_289.php)
- [4] Guide du ministère de l'énergie, ministère des énergies et des mines, édition 2007
- [5] <http://evnh.dz.cpubk-1.webhostbox.net/FR/index.php/>
- [6] [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur\\_nucl%C3%A9aire](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9acteur_nucl%C3%A9aire) 29
- [7] <http://www.sktm.dz/?page=article&id=530-uk->
- [8] :[http://www.iufmrese.cict.fr/.../A.../Energie\\_solaire\\_photovoltaique](http://www.iufmrese.cict.fr/.../A.../Energie_solaire_photovoltaique)  
[http://www.cythelia.fr/.../PV\\_Alain%20Ricaud\\_Sept-08](http://www.cythelia.fr/.../PV_Alain%20Ricaud_Sept-08)
- [9] :[http://www.photovoltaique.info/.../Epia\\_Techno](http://www.photovoltaique.info/.../Epia_Techno)
- [10] :[http://www.jsatechnology.net/energie\\_solaire\\_installati\\_panneaux-4Fran](http://www.jsatechnology.net/energie_solaire_installati_panneaux-4Fran)
- [11] :Meflah aissa « modélisation et commande d'une chaîne de pompage Photovoltaïque » Mémoire de Magister univ- abou bekr — tlemcen 11-2011
- [12] :<http://www.inti.be>
- [13] :Stéphan ASTIER « Conversion photovoltaïque de la cellule aux système »livre
- [14] N. Mäder, EKZ-Projekt: Smart Meter sparen weniger als erwartet, Bulletin SEV/AES 9/2011, Fehraltorf/Aarau, 2011

- [15] :Hassini nee bel-houda « modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque» mémoire de magistre Uni-telmcen -2010
- [16] S. Darby, Smart metering: what potential for householder engagement? Building Research & Information, Vol 38/5 (p 442-457), 2010
- [17] C. Rüede, M. Rauh, Les expériences internationales avec le smart metering: un enseignement pour la Suisse, Bulletin SEV/AES 4/2010, Fehraltorf/Aarau, 2010
- [18] E. Santacana et al., La prochaine évolution du réseau électrique, Bulletin SEV/AES 9/2010
- [19] : Thi minh ch « Couplage Onduleurs Photovoltaïques et Réseau, aspects contrôle/commande et rejet de perturbations »Thèse Docto-Uni-grenoble Janvier 201
- [20] : [http : //www.fr.scribd.com/doc/4597291/Généralités-sur-les-réseaux-électriques](http://www.fr.scribd.com/doc/4597291/Généralités-sur-les-réseaux-électriques)
- [21] :Abbassen –lyse « Etude de la connexion au réseau électrique d'un centrale Photovoltaïque » Mémoire de Magister univ-tizi ouzou 5 - 2011
- [22] :Fairouz kendouli « Etat de l'art et modélisation des microcentrales » Mémoire de Magister l'Univ- de constantine 2007
- [23] :[http :// www.EDF.fr](http://www.EDF.fr)
- [24] :Sonelgaze distribution d'Adrar

[25] U. Imholz, R. Zurbrugg, Smart Metering: Smart Metering : pour et pour les petites entreprises d’approvisionnement locales, Bulletin SEV/AES l, Fehraltorf/Aarau, 2011

[26] P. Hüsser, R. Mittelholzer, Le Smart Grid a besoin de projets pilotes, in SEV/AES 12s/2010, Fehraltorf/Aarau, 2010

[27] <http://www.smartgrid-schweiz.ch>

- [Mourshed, 2015] Monjur Mourshed et al, “Smart Grid futures : perspectives on the integration of energy and ICT services”, Energy Procedia, Vol. 75, pp. 1132-1137, 2015, doi:10.1016/j.egypro.2015.07531.

- [Niesten, 16] Eva Niesten, FloortjeAlkemade, “How is value created and captured in smart grids? A review of the literature and an analysis of pilot projects,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 53, pp. 629-638, 2016, doi:10.2016/j.rser.2015.08.069.



## Résumé

À long terme, le développement des smart grids devrait s'étendre à l'ensemble des réseaux interconnectés. Toutefois, l'implantation des réseaux intelligents dépend de l'efficacité des dispositifs techniques et de l'implication des parties prenante Parmi elles, les consommateurs auront un rôle clé. En effet, l'équilibre du système électrique sera davantage géré par l'utilisateur final. Une sensibilisation du public sur les enjeux du système sera alors nécessaire pour en comprendre l'utilité. Cela exigera aussi un accès aisé aux informations via des interfaces multiples et simples (Smartphones, ordinateurs, etc)

Au niveau politique, la Plateforme Technologique de l'Union européenne finance le développement des réseaux intelligents. Aux Etats-Unis, 4,5 milliards de dollars ont été investis dans la modernisation des réseaux prévue par l'American Recovery and Reinvestment Act de 2009

## الملخص

على المدى الطويل ، يجب أن يمتد تطوير الشبكات الذكية إلى جميع الشبكات المترابطة. ومع ذلك ، يعتمد تنفيذ الشبكات الذكية على كفاءة الأجهزة التقنية ومشاركة الجهات المعنية.

من بينها ، سيكون للمستهلكين دور رئيسي. في الواقع ، سيتم إدارة توازن النظام الكهربائي أكثر من قبل المستخدم النهائي. سيكون هناك حاجة إلى الوعي العام بقضايا النظام لفهم فائدتها. وسيطلب أيضًا الوصول السهل إلى المعلومات عبر واجهات متعددة وبسيطة (الهواتف الذكية وأجهزة الكمبيوتر وغيرها).

على المستوى السياسي ، يمول برنامج التكنولوجيا التابع للاتحاد الأوروبي تطوير الشبكات الذكية. في الولايات المتحدة ، تم استثمار 4.5 مليار دولار في تحديث الشبكة بموجب قانون الإنعاش الأمريكي وإعادة الاستثمار (ARRA) لعام 2009

## Abstract

In the long term, the development of smart grids should extend to all interconnected networks. However, the implementation of smart grids depends on the efficiency of technical devices and the involvement of stakeholders. Among them, consumers will have a key role. Indeed, the balance of the electrical system will be more managed by the end user. Public awareness of system issues will be needed to understand their utility. It will also require easy access to information via multiple and simple interfaces (smartphones, computers, et

At the political level, the Technology Platform of the European Union finances the development of smart grids. In the United States, \$ 4.5 billion has been invested in network modernization under the 2009 American Recovery and Reinvestment Act (ARRA)