

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté Technologie

Département Génie Mécanique



# THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCES**

Spécialité : Génie mécanique

Par

**Maamar dit Abdelkader MOUHEB**

Thème:

---

**Impact de la compensation utilisant l'énergie solaire photovoltaïque  
dans l'amélioration de la chute de tension dans les réseaux  
électriques BT**

---

Soutenue le 09/10/2019, devant le jury composé de :

KHELIL Ali	Professeur	UHBC	Président
AIT CHEIKH Mohamed Salah	Professeur	ENP Alger	Examineur
BOUTOUBAT Mohamed	Professeur	Univ Laghouat	Examineur
ZGAOUI Abdallah	MCA	UHBC	Examineur
MALEK Ali	Directeur de recherches	CDER	Rapporteur
LOUKARFI Larbi	Professeur	UHBC	Co-Rapporteur

# Remerciements

En premier lieu, je remercie ALLAH, Dieu Tout Puissant, de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail car ce travail ne peut pas être réalisé sans Son aide.

D'abord je remercie mon Promoteur Ali Malek directeur de recherche, Docteur au Centre de Développement des Energies Renouvelables CDER à Bouzaréah Alger, qui a consacré son temps pour encadrer ce travail. Merci pour ses précieux conseils, l'encouragement et la confiance qu'il m'a accordés pour l'accomplissement et le suivi de ce travail.

Un immense merci à mon Co-Promoteur Monsieur LARBI LOUKARFI, Professeur à l'université de Chlef. Je le remercie pour sa motivation; et parce qu'il m'a permis de mettre le premier pas dans le monde de la recherche.

Je remercie tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail:

- ✓ Monsieur Khelil Ali, Professeur à l'Université de Chlef, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.
- ✓ Monsieur Mohamed Salah AIT CHEIKH , Professeur à ENP Alger, qui a accepté de juger ce travail et pour m'avoir fait l'honneur d'être parmi les examinateurs.
- ✓ Monsieur Mohamed BOUTOUBAT Professeur à l'université de Laghouat, qui a accepté de juger ce travail et pour m'avoir fait l'honneur d'être parmi les examinateurs.

- ✓ Monsieur Abdallah ZEGAOUI, Maître de conférence à l'Université de Chlef, qui a accepté de juger ce travail et pour m'avoir fait l'honneur d'être parmi les examinateurs.

Je n'oublie pas bien sûr mes collègues et mes chers amis: B.Bendaoued, et R. Zahi

Je remercie également tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, avec une mention particulière à mes deux cher amis H. Mezoued et A. Hamaday.

Mes sincères gratitudes s'adressent à ma famille, surtout ma mère car sans leurs encouragements permanents et leur soutien moral, je ne serais parvenu là où je suis.

Merci à toutes les personnes que je n'ai pas citées et qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## Résumé

La distribution de l'énergie électrique pour les populations rurales à cause de l'isolement et le relief difficile, souffre de problèmes de chute de tension. Toutefois la satisfaction de la demande d'électricité pour la liaison au réseau nationale se heurte à plusieurs difficultés : la faible densité et la dispersion de la population, la faiblesse des revenus, alors il est nécessaire d'explorer de nouvelles solutions possibles, comme l'exploitation du potentiel solaire abondant dont disposent ces zones. Dans ce contexte, nous avons étudié l'impact d'injection de l'énergie photovoltaïque pour la solution de ce problème pour un cas réel d'un long réseau MT connectés à plusieurs réseaux BT situé dans une grande zone rurale à la wilaya de Chlef au nord d'Algérie. La connexion des systèmes photovoltaïques a permis d'améliorer la qualité électrique de la ligne grâce à l'injection dans le réseau de l'énergie solaire photovoltaïque propre surtout quand la pointe de la demande est en phase avec l'intensité de l'ensoleillement. Ainsi ces centrales photovoltaïques contribuent à la réduction des besoins d'acheter de l'électricité

**Mots clés:** Système photovoltaïque, réseau BT, réseau MT, chute de tension, ensoleillement.

## **Abstract:**

Generating electricity from solar energy can offer significant benefits especially for the rural population where the distribution of electric power suffers from voltage drop problems caused by isolation and difficult topography, so it is necessary to explore this new option, by exploitation of the abundant solar potential which has these areas. In this work we try to solve this by using photovoltaic system connected to LV and MV power grid, knowing that these systems can contribute to improving the voltage at the end of the network where the voltage drops reach impermissible values, as a result a negatively impact for the distributor and the customer. In this context, we studied the impact of injection the photovoltaic energy to solve this problem for a real case of a long MV network connected to multiple LV networks located at a large rural area in the province of Chlef (North of Algeria). The connection of photovoltaic systems has improved the electrical quality of the line grace the injection into the network of clean solar power especially when the peak demand is in phase with the intensity of sunlight. Thus allowing contributes to the reduction of purchasing electricity needs.

**Keywords:** voltage drop, photovoltaic system, MV network, LV network, solar energy, solar radiation.

## **ملخص:**

بسبب العزلة والتضاريس الصعبة، فإن إيصال الكهرباء لسكان الارياف ، يعاني من مشاكل انخفاض الجهد. ومع ذلك ، فإن تلبية الطلب على الكهرباء للاتصال بالشبكة الوطنية يواجه العديد من الصعوبات: بسبب انخفاض الكثافة وتشتت السكان ، وانخفاض الدخل ، لذلك فمن الضروري استكشاف حلول جديدة ممكنة ، مثل استغلال الإمكانيات الشمسية الوفيرة لهذه المناطق. في هذا السياق ، درسنا تأثير حقن الطاقة الكهروضوئية في شبكة كهربائية من اجل مشكلة لحالة واقعية لشبكة جهد متوسط متصلة بالعديد من شبكات الجهد المنخفض موجودة في منطقة ريفية كبيرة في ولاية الشلف. شمال الجزائر. أتاح توصيل الأنظمة الكهروضوئية تحسين الجودة الكهربائية للخط عن طريق ضخ الكهرباء الضوئية النظيفة في الشبكة ، خاصةً عندما تكون ذروة الطلب على الكهرباء تتناسب مع ذروة شدة أشعة الشمس. وبالتالي، تساهم محطات الطاقة الكهربائية الضوئية أيضا هذه في تقليل الحاجة إلى شراء الكهرباء

**كلمات مفتاحية:** النظام الكهروضوئي ، شبكة الجهد المنخفض ، شبكة الجهد المتوسط ، انخفاض الجهد ، أشعة الشمس

TABLE DES MATIERES

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre 1: Etat de l'art</b>	
1.1 Introduction .....	3
1.2 Recherche bibliographique.....	3
1.3 Systèmes photovoltaïques .....	5
1.4 Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	5
1.5 Onduleurs.....	8
1.7 Impacts de la production décentralisée sur les réseaux de distribution.....	13
1.8 Le photovoltaïque en Algérie.....	14
1.4 Conclusion.....	16
<b>Chapitre 2: Production d'énergie dispersée</b>	
2.1 Introduction.....	17
2.2 Le réseau électrique et son rôle.....	17
2.3 Description du réseau électrique basse tension.....	19
2.3.1 Normalisation de la basse tension.....	19
2.3.2 Expression du courant dans différents cas de distribution de la charge.....	19
2.3.3 Structures du réseau basse tension.....	20
2.3.4 Modèle de la ligne basse tension.....	21
2.3.5 Rayon d'action d'un poste MT/BT.....	22
2.4 Production décentralisée de l'énergie.....	23
2.4.1 Définition.....	23
2.4.2 Les avantages de la production décentralisée de l'énergie.....	23
2.4.3 Les types de GED.....	24
2.5 Impacts des générateurs d'énergie dispersée sur la tension.....	26
2.6 Optimisation de fonctionnement de la production décentralisée.....	29
2.7 Les GED et l'électrification rurale.....	29
2.8 Conclusion.....	30
<b>Chapitre 3: Amélioration de la tension dans les réseaux BT avec les systèmes PV</b>	
3.1 Introduction.....	31
3.2 Présentation générale de la méthodologie de travail.....	31
3.3 Situation électrique au district de Chlef.....	32
3.4 Présentation du réseau étudié.....	33
3.5 Profil de consommation.....	34
3.6 Outil informatique.....	35
3.7 Simulation des chutes de tension.....	38
3.8 Gisement solaire.....	40
3.9 Amélioration de la chute de tension.....	41
3.10 Impact de la connexion des SPV sur le courant des réseaux .....	46
3.11 Conclusion.....	47
<b>Conclusion générale</b> .....	48
<b>Bibliographie</b> .....	50

## Liste des Figures

<b>Fig. 1.1</b>	Schéma des deux types d'installations photovoltaïques couplées au réseau	6
<b>Fig.1.2</b>	Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V d'un module PV	7
<b>Fig. 1.3</b>	Caractéristiques I-V et P-V d'un module pour différents éclairagements	8
<b>Fig. 1.4</b>	Circuit équivalent au modèle simplifié d'une cellule PV	10
<b>Fig. 1.5</b>	Circuit équivalent au modèle d'une cellule PV réelle	11
<b>Fig. 1.6</b>	Circuit équivalent au modèle à quatre paramètres.	12
<b>Fig. 1.7</b>	Circuit équivalent au modèle à cinq paramètres	12
<b>Fig. 1.8</b>	Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle de deux diodes	13
<b>Fig. 1.9</b>	Irradiation solaire au niveau mondial	15
<b>Fig. 1.10</b>	Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée	15
<b>Fig. 1.11</b>	Moyenne d'irradiation solaire globale horizontale annuelle	16
<b>Fig. 2.1</b>	Schéma simplifié d'un réseau de distribution	18
<b>Fig. 2.2</b>	Charge concentrée à l'extrémité de la ligne	19
<b>Fig. 2.3</b>	Distribution uniforme de la charge.	20
<b>Fig. 2.4</b>	Distribution triangulaire de la charge	20
<b>Fig. 2.5</b>	Représentation de la ligne en $\pi$ .	21
<b>Fig. 2.6</b>	Modèle de la ligne courte.	22
<b>Fig. 2.7</b>	Tension le long d'une ligne sans installations photovoltaïques	27
<b>Fig. 2.8</b>	Tension le long d'une ligne avec injection d'électricité photovoltaïque	28
<b>Fig. 3.1</b>	Evolution de l'énergie électrique au district de Chlef	33
<b>Fig. 3.2</b>	Schéma du réseau étudié	34
<b>Fig. 3.3</b>	Profil de consommation énergétique trimestriel d'un abonné pour l'année 2016	34
<b>Fig. 3.4</b>	Consommation énergétique horaire d'une journée type du mois d'août d'un abonné au site étudié.	35
<b>Fig. 3.5.</b>	Fenêtre graphique avec courbes de puissances affichées	37
<b>Fig. 3.6</b>	Les composants: énergies renouvelables/réseaux traditionnels disponible chez le logiciel JPlec	37
<b>Fig. 3.7</b>	Tension horaire au bout de de trois réseaux BT étudiés.	38
<b>Fig. 3.8</b>	Chute de tension horaire au bout des trois réseaux BT étudiés	39
<b>Fig. 3.9</b>	Chute de tension à 13 <sup>h</sup> (heure de pointe) en fonction de la longueur de la ligne BT	39
<b>Fig. 3. 10</b>	Irradiation horaire concernant une journée type du mois d'aout au site étudié reçu par un plan horizontal	40
<b>Fig. 3.11</b>	Durée d'insolation concernant le site étudié	41
<b>Fig. 3.12</b>	Positions des centrales PV connectés au réseau MT	42
<b>Fig. 3.13</b>	Impact de la connexion des centrales PV sur la tension au long du réseau MT	42
<b>Fig. 3.14.a.</b>	Tension au long du réseau BT connecté au transformateur A.	43

<b>Fig. 3.14.b.</b> Tension au long du réseau BT connecté au transformateur B.	43
<b>Fig. 3.14.c.</b> Tension au long du réseau BT connecté au transformateur C.	43
<b>Fig. 3.15</b> Schéma montrant l'emplacement des mini-centrales PV connectés aux réseaux électriques BT	44
<b>Fig. 3.16.a.</b> Tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur A.	44
<b>Fig. 3.16.b.</b> Tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur B.	44
<b>Fig. 3.16.c.</b> Tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur C.	44
<b>Fig. 3.17.a.</b> Chute de tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur A	45
<b>Fig. 3.17.b.</b> Chute de tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur B.	45
<b>Fig. 3.17.c.</b> Chute de tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur C.	45
<b>Fig. 3.18.a.</b> Tension horaire au bout du réseau électrique BT connecté au transformateur A.	46
<b>Fig. 3.18.b.</b> Tension horaire au bout du réseau électrique BT connecté au transformateur B.	46
<b>Fig. 3.18.c.</b> Tension horaire au bout du réseau électrique BT connecté au transformateur C.	46
<b>Fig. 3.19.a.</b> Courant horaire au bout du réseau BT connecté au transformateur A.	47
<b>Fig. 3.19.b.</b> Courant horaire au bout du réseau BT connecté au transformateur B	47
<b>Fig. 3.19.c.</b> Courant horaire au bout du réseau BT connecté au transformateur C.	47

## Liste des Tableaux

<b>Tab. 1.1</b>	Potentiel solaire des trois principales zones de l'Algérie	16
<b>Tab. 3.1</b>	Caractéristiques générales du réseau étudié	33

# Abréviations

AC : Courant alternatif

AM : Masse d'air

BT : Basse tension

DC : Courant continu

DG : Générations décentralisées

GED : Génération d'Energie Dispersée

HT : Haute tension

MPP : Point de fonctionnement maximal.

MPPT : Recherche du point de fonctionnement maximal

MT : Moyen tension.

PD : Production décentralisée

PV : Photovoltaïque

SPV : Système photovoltaïque.

STC : Conditions standard

# Nomenclature

- CA : Consommation annuelle (kWh).
- e : Charge d'un électron ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  C).
- $E_{AC}$  : Energie du courant alternatif (kWh)
- $E_{DC}$  : Energie du courant continu (kWh)
- I : Courant (A).
- $I_C$  : Courant de cellule (A).
- $I_{cc}$  : Courant de court circuit (A).
- $I_{cc,ref}$  : Courant de court circuit aux conditions de références (A).
- $I_d$  : Courant d'une jonction non éclairée (A).
- $I_m$  : Courant maximal (A).
- $I_{m,ref}$  : Courant à la puissance maximale aux conditions de références (A).
- $I_p$  : Courant de fuite ( $\Omega$ ).
- $I_{ph}$  : Photocourant (A).
- $I_{ph,ref}$  : Photocourant aux conditions de référence (A).
- $I_{ref}$  : Courant aux conditions de référence (A).
- $I_s$  : Courant de saturation inverse de la diode (A).
- J : Numéro du jour de l'année.
- k : Constante de Boltzmann ( $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K).
- K : Facteur de température du module ( $m^2/W^2$ ).
- l : Longueur de la ligne (m).
- m : Facteur d'idéalité de la diode (cellule).
- m* : Masse atmosphérique
- P : Puissance (W).
- $P_c$  : Puissance crête ( $W_c$ ).
- $P_m$  : Point de puissance maximale (W).
- $R_p$  : Résistance parallèle (appelée aussi résistance shunt  $R_{sh}$ ) ( $\Omega$ ).
- $R_{p,eq}$  : Résistance parallèle équivalente du module ( $\Omega$ ).
- $R_s$  : Résistance série ( $\Omega$ ).
- $R_{s,eq}$  : Résistance série équivalente du module ( $\Omega$ ).
- $R_{sh}$  : Résistance shunt ( $\Omega$ ).

$S$  : Surface active de la photopile ( $m^2$ )

$T_a$  : Température ambiante ( $^{\circ}C$ ).

$T_c$  : Température de cellule ( $^{\circ}C$ ).

TUC : Température d'utilisation de cellule ( $^{\circ}C$ ).

$V$  : Tension (V).

$V_C$  : Tension de cellule (V).

$V_{co}$  : Tension de circuit ouvert (V).

$V_{co,M}$  : Tension en circuit ouvert du module ( $\Omega$ ).

$V_{co,ref}$  : Tension du circuit ouvert aux conditions de références (V).

$V_d$  : Tension aux bornes de la diode (V).

$V_m$  : Tension maximale (V).

$V_M$  : Tension du module (V).

$V_{m,ref}$  : Tension à la puissance maximale aux conditions de références (V).

$V_{ref}$  : Tension aux conditions de référence (V).

$V_t$  : Tension thermique.

$\mu_{I,cc}$  : Coefficient de température du court circuit (A/K).

$\mu_{v,co}$  : Coefficient de température du circuit ouvert (V/K).

$\eta$  : Rendement du photopile.

$\eta_{ond}$  : Rendement de l'onduleur.

# INTRODUCTION GENERALE

Les installations photovoltaïques raccordées au réseau peuvent contribuer à l'amélioration de la tension en bout de réseau où les chutes de tension atteignent des valeurs inadmissibles par conséquent des répercussions négatives sur le distributeur et le client. Sachant que les principaux paramètres caractérisant le service électrique sont la qualité de la tension dont le distributeur est tenu contractuellement à la respecter autour des valeurs admissibles. Egalement, le distributeur doit aussi respecter la continuité de la fourniture d'électricité. L'amélioration de la tension au bout du réseau électrique est possible à l'aide de plusieurs moyens : le renforcement des sections des conducteurs, installation de nouveaux postes MT/BT, etc. Les mini-centrales photovoltaïques raccordées au réseau électrique BT, représentent l'une des solutions utilisées pour résoudre ce problème, en produisant l'énergie électrique à l'endroit du déficit.

Dans ce travail, nous voulons étudier la rentabilité de l'intégration de la production photovoltaïque dans un réseau de distribution du point de vue technique, afin de pallier aux insuffisances de la charge et le redressement de la tension en bout de réseau. Dans ce contexte, nous avons étudié l'impact de l'injection de l'énergie photovoltaïque pour la résolution du problème concernant un cas réel d'un long réseau MT connectés à plusieurs réseaux BT situé dans une grande zone rurale à la wilaya de Chlef au nord d'Algérie. On a proposé deux méthodes différentes pour corriger la chute de tension, soit de connecter des centrales à la ligne MT ou des mini-centrales au bout de ligne BT. Le but était de déterminer les meilleures configurations des systèmes photovoltaïques raccordés à ce réseau qui contribueront à l'amélioration de manière significative les baisses de tensions lors de la pointe. En effet, une centrale photovoltaïque connecté au réseau électrique permet de redresser la tension et d'améliorer la puissance surtout quand la pointe de la demande est en phase avec l'intensité de l'ensoleillement.

Le présent travail est organisé en quatre chapitres principaux qui se présentent comme suit:

Le premier chapitre est consacré pour étude bibliographique sur les travaux qui s'intéressent en premier lieu sur l'énergie solaire, et surtout les travaux qui concerne l'étude du gisement solaire de notre pays, ensuite sur les travaux qui s'intéressent sur les systèmes PV raccordés aux

## Introduction générale

---

réseaux électriques, et surtout leurs productions électriques, et leurs impacts sur le réseau de distribution et le développement durable.

Dans le second chapitre, seront présentées les notions essentielles sur l'énergie solaire, puis, on commence à présenter une étude détaillée du système photovoltaïque, la présentation de ces différents composants, le principe de fonctionnement de chaque composant en arrêtant sur le système photovoltaïque raccordé au réseau électrique et ses caractéristiques spécifique. Après, on donne un aperçu théorique à une modélisation détaillée du comportement des différents composants du système photovoltaïque où l'on présentera un modèle de la cellule et du module photovoltaïque, en allant du modèle idéal le plus simple au modèle à une diode. Les influences des différents paramètres électriques et climatiques sur le comportement du générateur PV, y sont présentes.

Le troisième chapitre est consacré aux systèmes de production décentralisés de l'énergie ou ce qu'on appelle générateurs d'énergie dispersés (GED) comme nouvelle solution destinée à résoudre les problèmes de transport de l'énergie et son intérêt sur l'électrification rurale.

Le dernier chapitre de ce travail, est orienté vers l'étude de l'impact et de la faisabilité de l'intégration de la production d'énergie solaire photovoltaïque sur un réseau de distribution, ainsi que la recherche d'une méthode optimale pour corriger la chute de tension enregistrée au long du réseau étudié. Pour cela nous avons réalisé une étude de cas réel sur un long réseau MT rural connecté avec plusieurs branches BT. Ces réseaux BT souffrent de problème de chute de tension qui atteint des valeurs inacceptables, causant ainsi des désagréments pour la clientèle, suite à la perturbation leurs activités quotidiennes. On a essayé deux méthodes de compensation : la première était de connecter des centrales PV au réseau MT, la seconde était de connecter des mini-centrales aux réseaux BT. Ensuite on compare les résultats des deux méthodes dans le but de trouver la meilleure solution pour résoudre le problème étudié.

Enfin ce travail sera terminé par une conclusion qui discute les résultats obtenus. Conséquemment nous avons montré l'intérêt bénéfique d'un système PV connecté au réseau dédié à l'alimentation en énergie électrique des zones rural isolées.

# **Chapitre 1**

## **Etat de l'art**

## 1.1 Introduction

L'énergie solaire PV est une des source d'énergie comme une des énergies renouvelables capables de produire de l'électricité en grande quantité à long terme sans trop émettre de gaz à effet de serre. Le photovoltaïque est une technique destinée à transformer directement l'énergie provenant du rayonnement solaire en énergie électrique à l'aide de cellules solaires, sans passer par les procédés d'une centrale thermique.

Dans ce contexte, nous allons commencer ce chapitre une étude bibliographique sur les travaux qui s'occupent des systèmes PV raccordés aux réseaux électriques, et surtout leurs productions électriques, et leurs impacts sur le réseau de distribution et le développement durable. Ensuite, nous allons nous familiariser avec quelques notions de base de l'énergie solaire essentielles au calcul de diverses performances de systèmes liées au solaire telles que les modules solaires photovoltaïques. Afin d'exploiter au mieux cette ressource énergétique, et pour un bon dimensionnement des installations solaires. Pour cela, nous aborderons dans cette partie de ce chapitre, quelques notions sur les systèmes photovoltaïques, raccordé au réseau électrique. Ensuite, on va passer vers la modélisation du système PV, afin d'optimiser son fonctionnement et prévoir le comportement du système sous conditions de fonctionnement réelles. La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système PV.

## 1.2 Recherche bibliographique

Dans l'article [1], on trouve un aperçu complet des systèmes solaires photovoltaïques connectés au réseau. L'intention est de fournir un large spectre sur l'architecture d'un système PV solaire connecté au réseau et de composants constitutifs tels que cellule solaire, générateur photovoltaïque, suit du point de puissance maximale, filtres, convertisseurs DC-DC, onduleurs monophasés et inverseurs triphasés destinés aux chercheurs, concepteurs et ingénieurs travaillant sur l'énergie solaire et son intégration dans le réseau de distribution. Les inverseurs de phase ont également été présentés. Un autre travail dans [2], ce document examine l'influence du niveau d'insolation sur les indicateurs de qualité de l'énergie électrique produite, et l'efficacité d'un onduleur couplé au réseau fonctionnant dans le cadre d'une centrale photovoltaïque raccordée au réseau. Au cours de l'année, des données ont été enregistrées pour Moscou sur le rayonnement solaire entrant, et l'énergie à la sortie et à l'entrée de l'onduleur réseau, et la capacité de sortie fournie par une centrale photovoltaïque de 1 kW connectée au réseau. Les valeurs de seuil d'insolation pour un onduleur Solar River 1100 TL sont établies

expérimentalement, ce qui correspond au début et fin de fonctionnement stable de l'onduleur, ainsi que la valeur d'angle de phase requise pour l'énergie électrique fournie au réseau. On peut trouver aussi [3], une méthode de détection de défauts pour un module photovoltaïque dans des conditions partiellement ombragées est introduite. Elle consiste à utiliser un réseau de neurones artificiel pour estimer le courant et la tension de sortie photovoltaïques dans des conditions de travail variables. La mesure des données (irradiation solaire, température de la cellule, courant et tension photovoltaïques) au Laboratoire d'énergie renouvelable REL de l'Université de Jijel (Algérie) ont été utilisées. La comparaison entre le courant et les tensions estimées avec ceux mesurés fournissent des informations utiles sur l'état de fonctionnement du module photovoltaïque considéré. Pour déterminer l'efficacité de la méthode proposée, plusieurs modèles d'ombrage ont été étudiés. Les résultats ont montré que la méthode conçue détecte avec précision l'effet de l'ombrage sur le module photovoltaïque. Une expérience opérationnelle sur le terrain pour un système PV connecté au réseau sous un climat tropical est présenté dans l'article [4], le système est composé d'un générateur photovoltaïque (PV) de 5 kWc et d'un onduleur CC/CA de 6 kW. Les données de performance opérationnelle sont enregistrées afin de développer des modèles mathématiques précis pour le système ainsi que d'évaluer la productivité du système. Les résultats expérimentaux montrent que les performances PV moyennes (rapport performances théoriques / performances réelles) sont de 73,12%, tandis que les performances moyennes de l'onduleur (rapport efficacité théorique de l'onduleur / efficacité effective de l'onduleur) sont de 98,56%. De plus, il a été constaté que le facteur de rendement quotidien de l'installation photovoltaïque est de 2,51 kWh / kWc/ jour. Cependant, il est conclu que la productivité du système est inférieure au taux prévu et qu'il faut donc procéder à un contrôle système afin de diagnostiquer le problème de la faible productivité du système. Aussi dans un autre travail [5], il présente un nouveau modèle électrique de générateur photovoltaïque en le simulant et en le testant sur un micro-réseau typique pour évaluer ses performances en matière de gestion optimale de l'énergie des micro-réseaux. En outre, il introduit un cadre probabiliste basé sur une méthode de surmonter toutes les incertitudes liées à la gestion optimale de l'énergie des micro-réseaux de différentes énergies renouvelables des sources d'alimentation, telles que le photovoltaïque (PV), l'éolienne, la micro-turbine et les dispositifs de stockage. Par conséquent, l'incertitude est prise en compte pour les variations de la puissance de sortie d'éolienne et PV, l'erreur de prévision de la demande de charge et les modifications de l'enchère du réseau en même temps. Il est difficile de résoudre le problème de micro-réseaux avec toute son incertitude pour intervalles de temps de 24 heures, et considérez plusieurs égalité et inégalité en même temps. En fait, pour résoudre ce problème, le problème nécessite une

technique puissante qui, même si elle converge très rapidement, échappe aux optimisations locaux.

### 1.3 Systèmes photovoltaïques

Nous appelons système photovoltaïque l'ensemble des composants nécessaire à l'alimentation d'une application en un lieu précis, en toute fiabilité. Un système photovoltaïque sera donc constitué du module photovoltaïque, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants:

- Un système d'orientation ou de suivi.
- Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie).
- Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire.
- Un convertisseur DC/AC.
- Une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :

❖ Les systèmes PV avec stockage électrique (batterie d'accumulateurs électrochimiques), ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- Soit directement en courant continu.
- Soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu-alternatif (onduleur).

❖ Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi "au fil du soleil"). Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu – continu. Pour les systèmes sans batterie, il y a possibilité d'avoir recours à une forme de stockage qui ne soit pas de nature électrochimique.

❖ Les systèmes connectés au réseau local par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage. Ce choix évite de stocker l'énergie, donc plus de problème de batteries. Par contre on ne dispose pas de courant en cas de panne du réseau, même si le soleil brille. Et sur ce dernier type qu'on va consacrer notre étude.

### 1.4 Système photovoltaïque raccordé au réseau

Dans les pays disposant déjà d'un réseau de distribution électrique, une nouvelle pratique a vu le jour dans le courant des années 80. C'est l'injection de l'énergie électrique produite par un système PV à partir de l'énergie solaire dans le réseau électrique. Toute injection dans le réseau se traduit par une diminution de la demande sur les centrales thermique, (pour les pays utilisant des centrales thermiques pour la production de l'électricité) [6].

**Principe:** quand il y a du soleil, l'installation produit de l'énergie électrique en courant continu. Un onduleur transforme ce courant continu en un courant alternatif totalement identique à celui qui circule dans le réseau.

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. Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau électrique, l'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie, on ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau électrique. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des modules en courant alternatif au travers d'un onduleur, et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant. Car il doit respecter des normes sur sa qualité "sinusoïdale" [7].

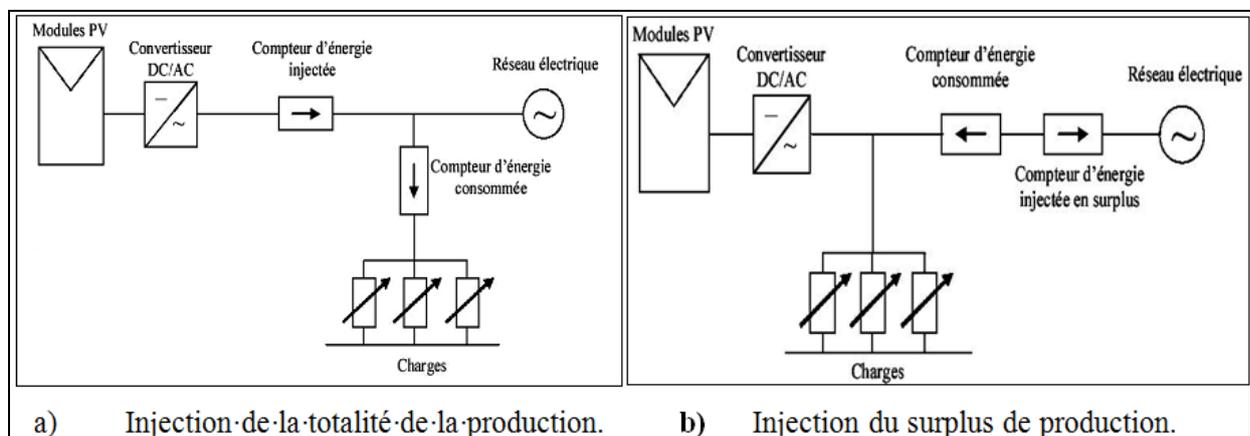
En plus de ce qu'on a vu précédemment, par rapport à un système autonome, on gagne sur les points suivants:

- Économie de l'ordre de 40% sur les investissements (les batteries en moins).
- Maintenance quasi inexistante (ce sont les batteries qui demandent le plus d'attention).
- Meilleure durée de vie du système [8].

Il existe deux types d'installations pour l'injection de la production solaire [7]:

❖ **Injection de la totalité de la production:** l'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque (Fig. 1.1. a).

❖ **Injection du surplus de production:** L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau (Fig. 1.1.b).



**Fig. 1.1** Schéma des deux types d'installations photovoltaïques couplées au réseau [7].

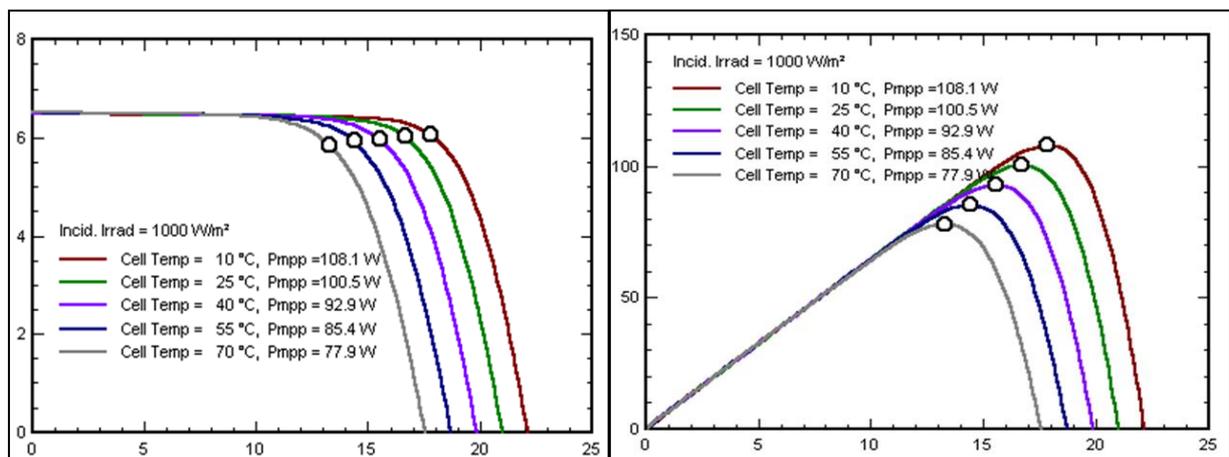
➤ **Influence de la température sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque:**

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules, elle a une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque, puisque les cellules sont exposées au rayonnement solaire, susceptible de les échauffer. De plus, une partie du rayonnement absorbé n'est pas convertie en énergie électrique: elle se dissipe sous forme de chaleur. C'est pourquoi la température d'une cellule est toujours plus élevée que la température ambiante. Pour estimer la température de cellule  $T_c$  à partir de la température ambiante  $T_a$ , on peut utiliser la formule de correction suivante [9]:

$$T_c = T_a + \frac{G_m}{800} (TUC - 20) \quad (1.1)$$

La température d'utilisation de la cellule (TUC en français et NOCT en anglais), est la température qu'atteint une cellule encapsulée dans un module soumis à une irradiance de  $800\text{W/m}^2$ , à une température ambiante de  $20^\circ\text{C}$ , une inclinaison de  $45^\circ$  et avec un vent de  $1\text{ m/s}$  dans les conditions de circuit ouvert [9]. La figure (1.2) représente la caractéristique courant-tension et puissance-tension d'un module (PV) solaire en fonction de la température, sous un éclairage constant. Une augmentation de la température entraîne:

1. Une chute importante de la tension.
2. Une légère augmentation du courant.
3. Globalement une perte non négligeable de puissance.



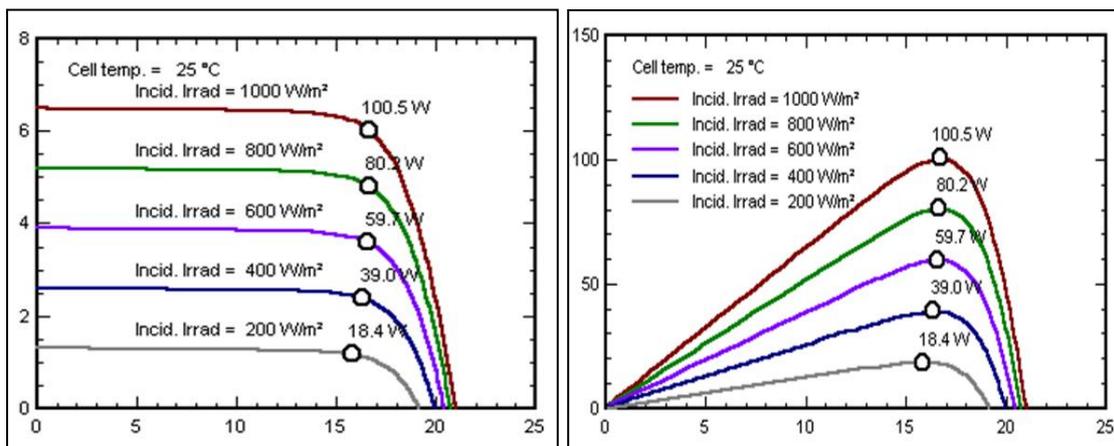
**Fig. 1.2** Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V d'un module (PV). [10]

➤ **Influence de l'éclairement sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque:**

L'apport d'énergie permettant la séparation électron-trou étant assuré par l'énergie lumineuse, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement  $G$  entraîne automatiquement l'augmentation des paires électron-trou séparées. Le courant débité  $I_{ph}$  est

donc proportionnel à l'ensoleillement  $G$ . Donc l'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

Nous allons présenter dans La figure (1.3) les caractéristiques I-V et P-V d'une cellule monocristalline pour plusieurs intensités de rayonnement solaire. Dans la partie gauche des caractéristiques I-V, le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairement. Ce qui entraîne une augmentation remarquable de la puissance. La tension par contre n'est pas très dégradée lorsque la lumière baisse. Nous remarquons que la tension  $V_m$  correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant  $I_m$  qui augmente fortement avec l'éclairement [6], [9].



**Fig. 1.3** Caractéristiques I-V et P-V d'un module pour différents éclairagements. [10]

## 1.5 Onduleurs

Les onduleurs sont des appareils que l'on dispose généralement entre le champ PV et la charge, servant à transformer la tension continue fournie par les modules pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. La principale caractéristique de l'onduleur PV réside dans la recherche du point de fonctionnement maximal ou MPPT en anglais « Maximum Power Point Tracking » car le générateur PV a une caractéristique courant/tension non-linéaire [10].

### ❖ Rendement

C'est sans conteste le critère de choix principal. Nous désirons perdre le moins d'énergie possible entre les capteurs et la charge. Les appareils modernes performants atteignent un rendement supérieur à 90 % dès que la charge est de 5 à 10 % de leur puissance nominale [10].

Le rendement maximal des onduleurs ne cesse d'augmenter. La norme est aujourd'hui un rendement maximal de 95,2%, mais de performants onduleurs atteignent des pics de 98%. Dans les prochaines années, la norme sera de 99%. Afin de limiter les pertes, il doit être placé le plus près possible des panneaux photovoltaïques [10].

Le rendement de l'onduleur ( $\eta_{\text{ond}}$ ) est le rapport de l'énergie totale générée par le système PV à l'énergie totale générée par les rangées photovoltaïques [11].

$$\eta_{\text{ond}} (\%) = (E_{\text{AC}} / E_{\text{DC}}) \times 100 \quad (1.2)$$

#### ❖ Onduleurs pour couplage au réseau:

Il a pour rôle de convertir le courant continu des modules photovoltaïques en courant alternatif identique à celui du réseau. C'est un appareil électronique de haute technologie conçu pour répondre à toutes les exigences du réseau, comme la qualité, la sécurité et la fiabilité, et pour permettre un contrôle parfait du fonctionnement.

Tous les onduleurs couplés au réseau incorporent une mesure du point de fonctionnement maximal des panneaux (MPP) et quelques caractéristiques communes comme une déconnexion automatique en cas d'absence de réseau, une production minimale d'harmoniques et une précision élevée de la fréquence [10]. Au niveau des onduleurs, il faut respecter dans la mesure du possible les règles de l'art du dimensionnement à savoir qu'il est préférable que la puissance nominale des onduleurs ne dépasse pas 80% de la puissance crête de l'installation.

### 1.6 Modélisation des composants du système PV raccordé au réseau

La modélisation d'un système physique conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle et de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité.

Après avoir étudié les différents composants du système photovoltaïque, nous procédons à la modélisation du système PV, afin d'optimiser son fonctionnement et prévoir le comportement du système sous conditions de fonctionnement réelles

#### 1.6.1 Modélisation de la cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque en polarisation directe (sous éclairage), certains sont simples ne mettant en œuvre que peu de paramètres, d'autres sont complexes mais décrivent au mieux la cellule PV.

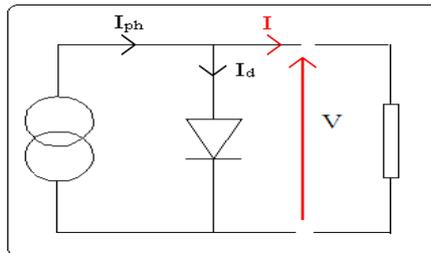
##### 1.6.1.1 Modèle d'une diode

###### a- Modélisation d'une cellule photovoltaïque idéale

C'est le modèle le plus cité dans la littérature et le plus utilisé en raison de sa simplicité, dans ce modèle la cellule photovoltaïque est caractérisée par son schéma électrique équivalent qui se compose d'une source idéale de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique et qui produit un courant  $I_{\text{ph}}$  (photo-courant) proportionnel à la puissance lumineuse en parallèle avec une diode qui modélise la jonction p-n.(Fig. 1.4). Si nous connectons une

charge résistive aux bornes de cette cellule photovoltaïque, cette dernière y débite une part de courant  $I$  et le reste, le courant  $I_d$ , dans la diode. Donc le courant d'une cellule solaire est la différence entre un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la quantité de photons reçus par la cellule et le courant  $I_d$  d'une jonction non éclairée et l'équation courant tension I-V du circuit équivalent simplifié est déduite à partir de la loi de Kirchoff [12]:

$$I = I_{ph} - I_d \quad (1.3)$$



**Fig. 1.4** Circuit équivalent au modèle simplifié d'une cellule PV [12].

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation [12] :

$$I_d = I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{V_d}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (1.4)$$

Et:

$$V_t = kT/e \quad (1.5)$$

La tension aux bornes de la charge ( $V$ ) est égale à celle aux bornes de la diode ( $V_d$ ) :

$$V = V_d \quad (1.6)$$

Nous utilisons les trois formules précédentes, et nous trouvons donc que le courant débité par la cellule équivaut à :

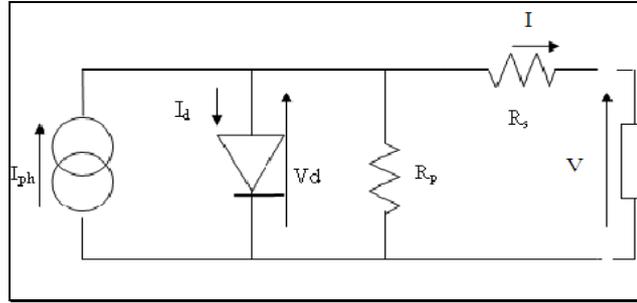
$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{V}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (1.7)$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

### **b- Modélisation d'une cellule photovoltaïque réelle**

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, nous observons une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. Nous modélisons donc cette perte de tension

par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_p$ . (Fig. 1.5). La résistance parallèle  $R_p$  (appelée aussi résistance shunt  $R_{sh}$ ) est en générale très élevée, et lorsqu'elle est faible, la cellule solaire ne donnera plus de tension sous faible éclaircissement [13].



**Fig. 1.5** Circuit équivalent au modèle d'une cellule PV réelle [13].

Nous appliquons la loi de Kirchhoff [13].:

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (1.8)$$

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (1.9)$$

Nous aurons finalement :

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{V + I.R_s}{m.V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (1.10)$$

C'est une équation implicite en  $I$  et  $V$  qui peut être résolue grâce à une méthode numérique (la méthode de Newton-Raphson par exemple). Trois modèles différents sont étudiés:

#### ❖ Modèle explicite

Ce modèle ne nécessite que trois points significatifs de la courbe I-V: le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), la tension de circuit ouvert ( $V_{co}$ ), le courant ( $I_m$ ) et la tension ( $V_m$ ) au point de puissance maximale. La caractéristique I-V est décrite par [12]:

$$I = I_{cc} \cdot \left[ 1 - C_1 \cdot \left( \exp\left(\frac{V}{C_2 \cdot V_{co}}\right) - 1 \right) \right] \quad (1.11)$$

Avec :

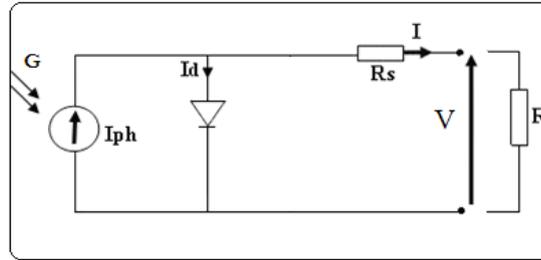
$$C_1 = \left( 1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \exp\left(\frac{-V_m}{C_2 \cdot V_{co}}\right) \quad (1.12)$$

Et :

$$C_2 = \frac{\frac{V_m}{V_{co}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right)} \quad (1.13)$$

❖ **Modèle implicite à quatre paramètres :**

Dans ce modèle nous considérons que la résistance shunt (parallèle) est beaucoup plus élevée ( $R_p \rightarrow \infty$ ) que la résistance série, donc nous pouvons négliger le courant dévié dans  $R_p$  ( $I_p \approx 0$ ). Le circuit électrique équivalent à ce modèle est présenté en (Fig. 1.6).



**Fig. 1.6** Circuit équivalent au modèle à quatre paramètres. [12]

Et l'équation (1.10) devient :

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right] \tag{1.14}$$

Les quatre paramètres de ce modèle sont :

$I_{ph}$  : courant photonique.

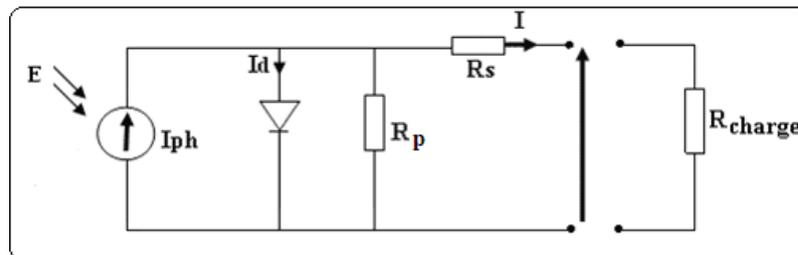
$I_s$  : courant de saturation inverse.

$a = m \cdot V_t$  : facteur de qualité.

$R_s$  : résistance série.

❖ **Modèle implicite à cinq paramètres:**

Ce modèle décrit mieux la cellule photovoltaïque puisqu'il prend en considération la résistance en parallèle  $R_p$ , c'est-à-dire que le courant de fuite qui passe vers cette résistance  $I_p$ , n'est pas négligé. Le circuit électrique équivalent à ce modèle est présenté en (Fig. 1.7).



**Fig. 1.7** Circuit équivalent au modèle à cinq paramètres. [12]

Et l'équation qui décrit ce modèle reste la même (1.10): [12]:

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left[ \exp\left(\frac{V + I.R_s}{m.V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (1.15)$$

Les cinq paramètres de ce modèle sont :

$I_{ph}$  : le courant photonique.

$I_s$  : courant de saturation inverse.

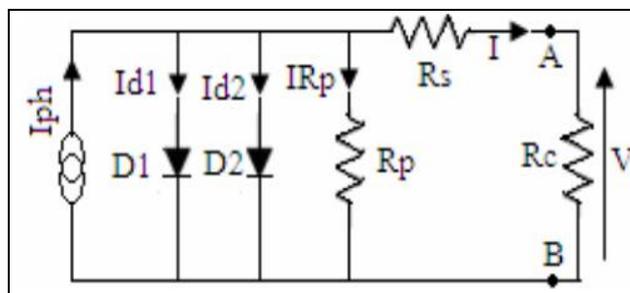
$a = m.V_t$  : facteur de qualité.

$R_s$  : la résistance séries.

$R_p$  : la résistance parallèle (shunt).

### 1.6.1.2 Modèle de deux diodes

Dans ce modèle une diode supplémentaire est mise en parallèle au circuit du modèle simple d'une diode Fig. 1.8 Cette diode est incluse pour fournir une courbe caractéristique I-V bien plus précise, qui prit en compte la différence dans l'écoulement du courant aux basses valeurs courantes dues à la recombinaison de charges dans la région de la zone de charge d'espace du semi-conducteur. Alors la diode D1 modélise la diffusion des porteurs dans la base et l'émetteur. Son influence sera d'autant plus grande que le matériau présentera une bonne longueur de diffusion. Par contre la diode D2 modélise la génération/recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace [14].



**Fig. 1.8** Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle de deux diodes [14].

## 1.7 Impacts de la production décentralisée sur les réseaux de distribution

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

puissance active sur certaines lignes, ainsi que de la diminution du temps d'élimination critique de défauts. [15]

Les GED fournissent de l'énergie près des points de consommation, diminuant ainsi les transits de puissance active et donc les pertes en ligne sur le réseau de transport, mais sont pénalisantes du point de vue de l'exploitation des réseaux de distribution pour les raisons citées plus haut ajoutées aux risques d'oscillations de puissance active et leur corollaire qui est une stabilité dégradée [15].

Une partie de ces GED a, de plus, des sources d'énergie primaire intermittentes (éolien, solaire) qui ne permettent pas de prévoir aisément la production disponible à court terme. Elles ne peuvent donc pas garantir une puissance de sortie et proposer toute la puissance disponible sur le marché. D'autre part, ces nombreuses sources sont trop petites pour être observables et dispatchées par les gestionnaires de réseaux de distribution et ne participent donc pas, aujourd'hui, aux services système. Cela peut poser des problèmes en cas de fort taux de pénétration si les moyens de réglage classiques de la distribution deviennent inaptes à assurer la tenue en tension. Cela peut contraindre par exemple les gestionnaires de réseaux à engager des investissements non prévus initialement [15].

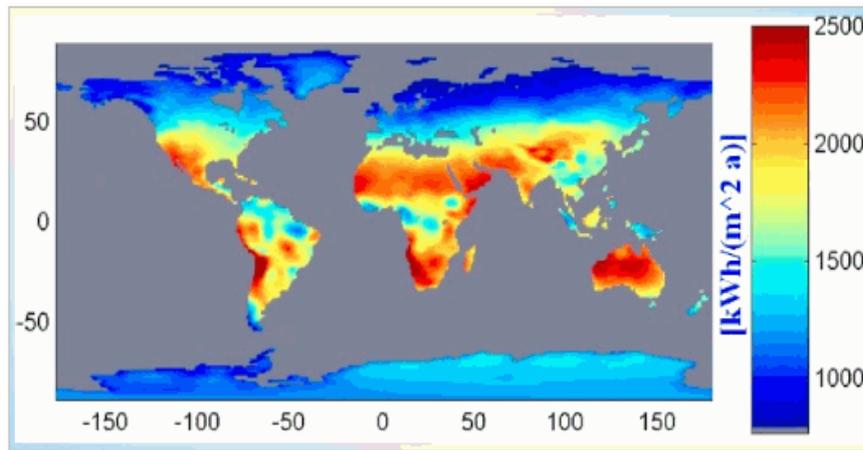
Une partie de ces GED produisant par construction du courant continu (pile à combustible, panneau solaire) doit être raccordée au réseau par l'intermédiaire d'interfaces d'électronique de puissance, injectant ainsi des harmoniques nuisibles à la qualité de la tension délivrée [15].

En effet, la production de puissance par les GED réduit le courant traversant le transformateur, provoquant une action du régulateur en charge et diminuant ainsi la tension au niveau du poste source. Cependant une partie de ces impacts pourraient être maîtrisée par une gestion mutualisée des GED. Cette idée de mutualisation est développée dans le paragraphe suivant sous le terme de centrale virtuelle [15].

La multiplication des GED dans les réseaux de distribution qui ne sont pas conçus pour les accueillir pose de nombreux problèmes liés à la qualité de l'énergie et à la mise à mal des principes actuels d'exploitation. Il existe de nombreux projets de recherche en cours pour l'étude de différents aspects de la problématique de l'insertion de GED dans les réseaux de distribution. Ces projets traitent de différents aspects techniques et économiques de l'insertion massive de GED dans les réseaux de distribution [15].

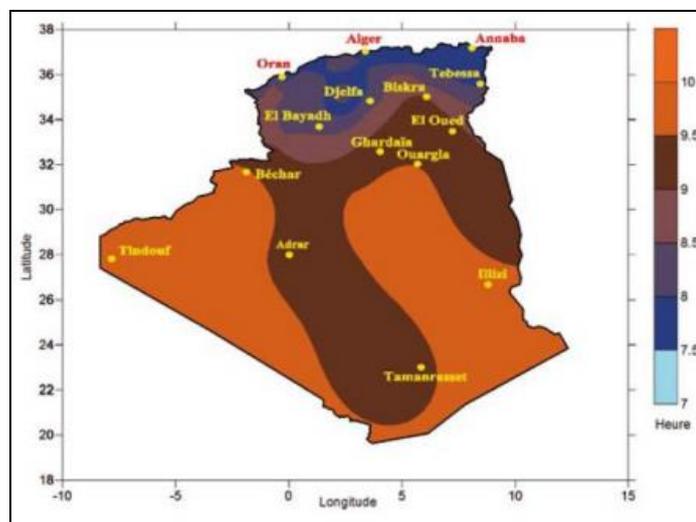
## **1.8 Le photovoltaïque en Algérie**

L'Algérie est bien dotée en matière de gisement solaire (fig. 1.9); c'est la ressource renouvelable la plus abondante.



**Fig. 1.9** Irradiation solaire au niveau mondial [12].

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures par an et peut atteindre 3900 heures par an sur les hauts plateaux et le Sahara. La moyenne annuelle de la durée d'insolation est illustrée dans la figure 1.10 [16]. Pour la partie nord du pays, la durée d'insolation varie de 5 h/jour pendant les mois d'hiver à plus de 11 h/jour pendant les mois d'été. En revanche, la région sud du pays bénéficie d'une plus grande durée d'insolation qui dépasse les 8 h/jour durant la saison hivernale et qui pourrait atteindre 12h/jour durant la saison estivale [17]. Cette durée d'insolation reflète la grande disponibilité de l'énergie solaire sur le territoire nationale.



**Fig. 1.10** Moyenne annuelle de la durée d'insolation mesurée [16]

L'énergie solaire reçue sur un plan horizontal dépasse les 4,5 kWh/m<sup>2</sup>/jour sur la majeure partie du territoire national. Les données publiées dans l'atlas solaire Algérien [17] indique que la valeur moyenne de l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale passe de 4,7kWh/m<sup>2</sup>/j au nord à 7,1 kWh/m<sup>2</sup>/jour au sud comme le montre la figure 1.11. Ce niveau d'irradiation combiné avec l'importante durée d'insolation place l'Algérie parmi les pays qui

possèdent le plus grand niveau d'irradiation solaire au monde avec 1700kWh/m<sup>2</sup>/an au nord et 2650kWh/m<sup>2</sup>/an au sud. Selon cette présentation du potentiel théorique de l'Algérie, nous pouvons en déduire qu'elle figure parmi les régions les plus favorables pour l'utilisation de l'énergie solaire. Le Tableau 1.1 récapitule le potentiel solaire des trois principales zones (côtière, haut plateau, Sahara) de l'Algérie [18].

Tableau 1.1 : Potentiel solaire des trois principales zones de l'Algérie [18].

Zones	Zone côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée d'insolation (h/an)	2650	3000	3500
Irradiation solaire (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650
Potentiel solaire (TWh/j)	443,96	1240,89	14 870,63

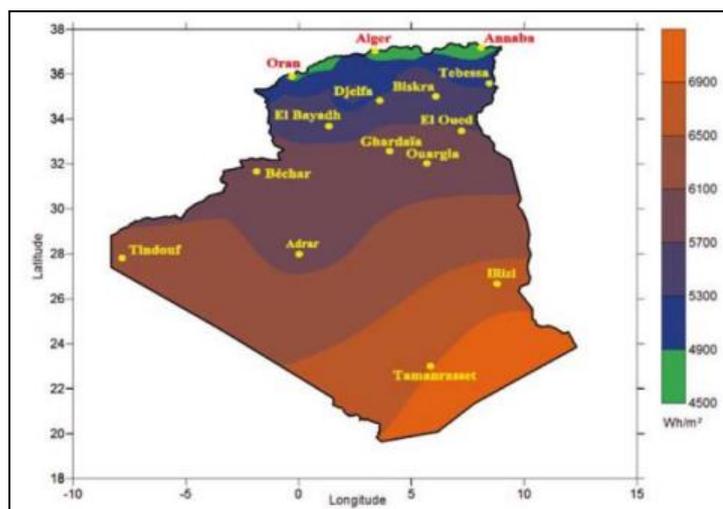


Fig. 1.11 Moyenne d'irradiation solaire globale horizontale annuelle [16]

### 1.9 Conclusion

Au cours de ce chapitre, notre travail a été commencé par des brèves notions essentielles sur l'énergie solaire, ensuite nous avons dressé un état des lieux des systèmes de production d'électricité PV afin de présenter les bases indispensables à la compréhension du sujet. Pour cela nous avons abordé les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de captage photovoltaïque. Aussi que les principes de fonctionnement des éléments essentiels. L'objectif de ce chapitre était de fournir les modèles électriques du générateur PV qui peuvent prévoir son comportement électrique sous des conditions de fonctionnement réelles.

# Chapitre 2

Production d'énergie  
dispersée

## 2.1 Introduction

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

Le système électrique est organisé d'une manière hiérarchisée qui comprend trois composantes principales: production, réseau de transport ainsi que réseau de distribution. Le secteur de production fournit l'énergie électrique produite par des centrales, cette énergie est ensuite transmise par le réseau de transport et puis délivrée aux consommateurs finaux au travers du réseau de distribution. Le réseau de distribution est dit « passif » dans le sens où le flux de puissance est toujours unidirectionnel le long des départs alimentés par le poste source. Depuis plusieurs années, les productions décentralisées (distributed génération ou DG) sont de plus en plus raccordées dans le système électrique, notamment dans le réseau de distribution, rendant ce dernier plus actif en modifiant les flux de puissances qui peuvent devenir bidirectionnels. Dans un réseau de distribution conventionnel (sans DG), la tension baisse le long du départ, avec un point haut au départ. Cette situation peut être changée avec le raccordement des DG. L'énergie électrique étant alors et jusque dans les années 1990 produite de manière presque exclusivement centralisée, et consommée de manière totalement décentralisée.

La production décentralisée notamment à base d'énergie renouvelable pénètre de plus en plus dans les réseaux électriques, ces producteurs sont généralement désignés sous le terme de "Génération d'Énergie Dispersée" ou GED.

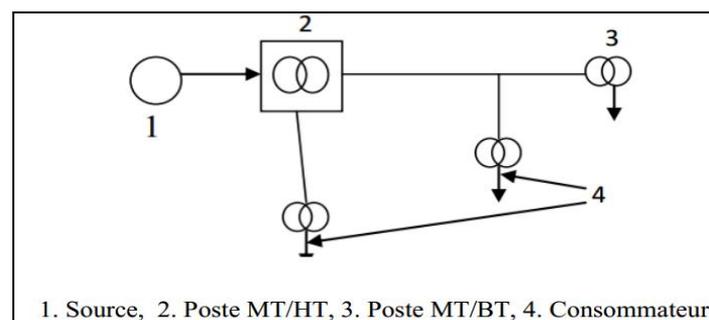
## 2.2 Le réseau électrique et son rôle

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs [19]. Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Du point de vue physique, le réseau électrique est organisé en différents niveaux de tension: le réseau de transport et de répartition, auxquels sont connectés les

grands groupes de production centralisée, et le réseau de distribution alimentant la plupart des consommateurs (Fig. 2.1).

Un réseau de distribution est la partie d'un réseau électrique desservant les consommateurs d'électricité. Il achemine l'énergie électrique d'un réseau de transport aux transformateurs desservant les clients locaux. Ils sont composés de postes source (avec les transformateurs, les équipements de compensation, et ceux de protection et contrôle-commande), et de lignes aériennes ou souterraines assurent la distribution de l'énergie électrique au niveau local. Leur tension est inférieure ou égale à 50 kV. Ils sont constitués de deux types de réseaux : le réseau moyenne tension (MT), connecté au réseau de transport, et le réseau basse tension (BT) [15].

- **Réseau de distribution à moyenne tension MT:** La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de répartition aux points de moyenne consommation (supérieure à 250 kVA). Ces points de consommation sont :
  - Soit du domaine public, avec accès aux postes de distribution publique MT/BT.
  - Soit du domaine privé, avec accès aux postes de livraison aux abonnés à moyenne consommation. Le nombre de ces abonnés ne représente qu'un faible pourcentage du nombre total des consommateurs livrés directement en BT. Ils sont essentiellement du secteur tertiaire, tels les hôpitaux, les bâtiments administratifs, les petites industries, La structure sur ces réseaux est de type aérien ou souterrain et les tensions sont comprises entre quelques kilovolts et 40 kV.
- **Réseau de distribution à basse tension BT:** La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. 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. Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 100 et 440 V. Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement



**Fig. 2.1** Schéma simplifié d'un réseau de distribution [15].

- **Niveau de tension**

Les deux grandeurs fondamentales pour l'exploitation d'un réseau sont la tension et la fréquence. Pour des fréquences de fonctionnement du réseau de 60 Hz (Amérique du nord, une partie de l'Amérique du sud, une partie du Japon) ou 50 Hz (reste du monde) des organismes de normalisation comme la Commission Electrotechnique International (CEI) ont classé les réseaux par niveau de tension normalisées [20].

Les notations de la norme CEI 38 seront parfois utilisées avec les définitions suivantes:

- ✓ HT : pour une tension composée comprise entre 100 kV et 1000 kV.
- ✓ MT : pour une tension composée comprise entre 1000 V et 35 kV.
- ✓ BT : pour une tension composée comprise entre 100 V et 1000 V. Les valeurs normalisées sont : 400 V - 690 V - 1000 V (à 50 Hz).

## 2.3 Description du réseau électrique basse tension

### 2.3.1 Normalisation de la basse tension:

Actuellement les réseaux électriques basse tension sont alimentés comme suit [21]:

B1: 220 Volts entre phase et neutre.

B2: 380 Volts entre phases.

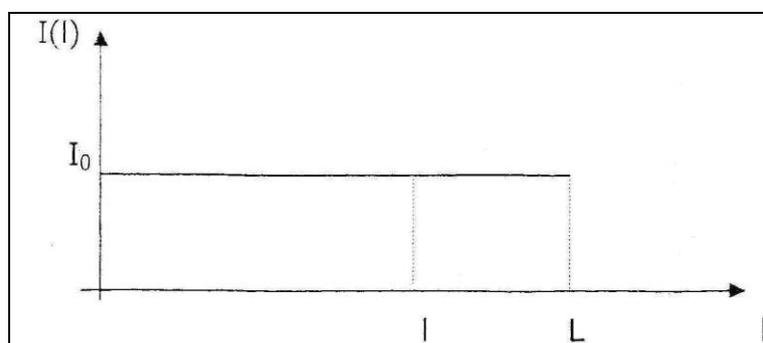
### 2.3.2 Expression du courant dans différents cas de distribution de la charge :

Soit l'expression du courant en fonction de la longueur de la ligne:  $I(l)$ ; la distribution de l'intensité sur la longueur de la ligne se fait de différentes façons [21]:

- **Charge concentrée à l'extrémité de la ligne :**

Le modèle utilisé est :

$$I(l) = I_0 \quad (2.1)$$



**Fig. 2.2** Charge concentrée à l'extrémité de la ligne [21].

- **Distribution uniforme de la charge:**

Le modèle utilisé est:

$$I(l) = I_0 - I_0 \cdot l/L \quad (2.2)$$

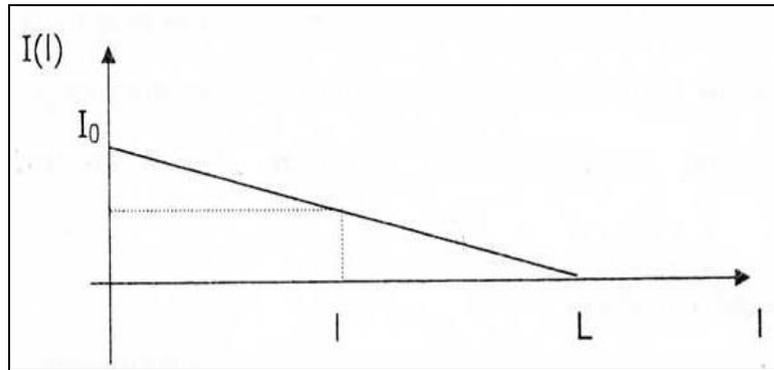


Fig. 2.3 Distribution uniforme de la charge [21].

- **Distribution triangulaire de la charge:**

Le modèle utilisé est:

$$I(l) = I_0 - I_0 \cdot l^2/L^2 \quad (2.3)$$

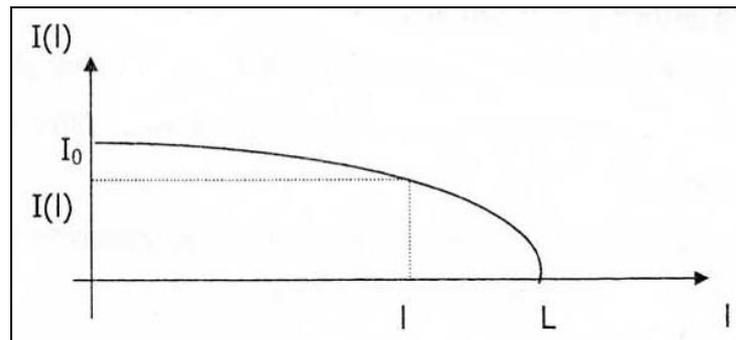


Fig. 2.4 Distribution triangulaire de la charge [21].

Nous remarquons que la plus haute intensité de courant est toujours enregistrée sur le tronçon de tête de départ.

### 2.3.3 Structures du réseau basse tension:

La structure des réseaux basse tension est arborescente à deux ordres de lignes : dorsales et dérivations. Des sous-dérivations peuvent être utilisées pour alimenter des charges isolées.

Les réseaux basse tension sont constitués de lignes aériennes et de câbles souterrains permettant de transiter l'énergie électrique depuis un poste source MT/BT jusqu'aux consommateurs. Ces derniers sont dispersés sur un espace plus ou moins vaste qu'on appelle zone d'action du poste MT/BT.

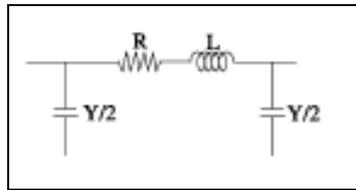
Les lignes aériennes sont surtout utilisées pour alimenter des zones rurales et semi-rurales. En zone urbaine, les exigences de l'environnement imposent de dissimuler totalement les réseaux de distribution, cela pour la sécurité totale des usagers [21].

### 2.3.4 Modèle de la ligne basse tension:

Le comportement d'une ligne permettant le transfert d'énergie peut être assimilé, sous certaines conditions à celui d'un modèle en  $\pi$ . Sa représentation est montrée sur la figure 2.5. Ce modèle comprend [22]:

- Une résistance traduisant la résistivité des matériaux de la ligne, sa longueur et sa section.
- Une inductance qui est le rapport entre le champ magnétique total du flux de fuite et le courant qui traverse la ligne.
- Une capacité traduisant l'effet du champ électrique créé.

Ces trois paramètres sont dépendants de la longueur de la ligne.



**Fig. 2.5** Représentation de la ligne en  $\pi$  [22].

Dans le cas d'une ligne courte, la capacité peut être ignorée. Son élimination n'a que très peu d'effet sur la tension ou sur le courant. Dans la littérature, il apparaît que les capacités sont prises en compte si la longueur de la ligne est supérieure à 80 km ou si la tension est supérieure à 69 kV.

Le modèle de ligne courte se réduit à une impédance série par unité de longueur. La figure 2.6 présente ce modèle où  $R$  et  $L$  sont la résistance et l'inductance par phase et par unité de longueur  $l$ . En prenant les notations de la figure 2.6, les grandeurs de sortie peuvent s'exprimer en fonction des grandeurs d'entrée. Sa forma matricielle est donnée par l'équation suivante [22]:

$$\begin{pmatrix} V_s \\ I_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_r \\ I_r \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

En identifiant avec le modèle de la ligne courte on a:

$$A=1 \quad B=Z \quad C=0 \quad D=1, \text{ avec:}$$

$$Z=(R+j L \omega).l \quad (2.5)$$

$l$ : la longueur de la ligne.

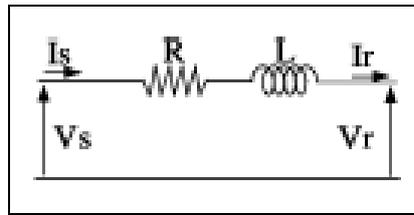


Fig. 2.6 Modèle de la ligne courte [22].

### 2.3.5 Rayon d'action d'un poste MT/BT

Les transformateurs (ou poste MT/BT) apparaissent souvent comme des interfaces entre sous réseaux à niveaux de tension différents. Les transformateurs triphasés des réseaux basse tension sont utilisés pour passer de 30 kV (moyen tension) à 400V (basse tension), ils sont composés de trois transformateurs monophasés [22].

Par définition, le rayon d'action d'un poste MT/BT, c'est-à-dire la longueur de la dorsale, est la moitié de la surface desservie. Il dépend de la capacité thermique des conducteurs et des limites de chute de tension admissibles dans les réseaux de distribution [21].

Le cahier de charges relatif aux conditions de fourniture de l'électricité, stipule dans son article 14 [21]:

«La tolérance maximum pour la variation de la tension autour de la tension normale est de :

- 5% pour les zones urbaines à usage éclairage prépondérant.
- 10% pour les zones rurales ou industrielles à usage force motrice prépondérant».

Il faut savoir qu'il est interdit d'alimenter des clients faisant partie de groupes de logements ou de lotissements, à partir des réseaux basse tension existant. Ceci risque d'étendre le rayon d'action du poste de distribution publique à des limites où la qualité de la tension ne peut plus être assurée.

Un transformateur installé à une année donnée doit pouvoir débiter la puissance appelée pour les abonnés BT qu'il alimente pendant un certain nombre d'années.

La puissance débitée par un poste MT/BT croît d'année en année pour les deux raisons suivantes:

- Le nombre d'abonnés croît suite aux raccordements nouveaux, ce qu'on appelle l'accroissement en surface.
- La puissance appelée par chaque abonné existant croît aussi, suite à l'introduction des équipements électroménagers, et c'est ce qu'on appelle l'accroissement en profondeur.

Ainsi, lorsqu'on dimensionne un transformateur, on tient compte de ces deux paramètres:

- L'accroissement en surface.
- L'accroissement en profondeur [21].

## 2.4 Production décentralisée de l'énergie

### 2.4.1 Définition

La production décentralisée ou dispersée se définit par opposition à la production centralisée, par unités de grosses puissances raccordées au réseau HT, dont la localisation et la puissance ont fait l'objet d'une planification, et qui sont commandées de manière centralisée pour participer au contrôle de la fréquence et de la tension, et assurer un fonctionnement fiable et économique de l'ensemble du réseau. Ces unités centralisées sont dites « dispatchables ». Par rapport aux unités classiques, les unités décentralisées sont caractérisées par des puissances ne dépassant pas 50 à 100 MW, ne sont pas planifiées de manière centralisée, elles sont généralement raccordées au réseau de distribution. Cette production décentralisée se développe dans tous les pays, sur base d'unités de cogénération, d'énergies renouvelables ou de production traditionnelle, installées par des producteurs indépendants [23].

Traditionnellement, le renforcement du système de production électrique se fait par l'insertion de nouvelles unités de production centralisée au réseau de transport. Au cours de ces dernières années, la tendance de libéralisation du marché de l'électricité a favorisé l'apparition de nombreux producteurs dans les réseaux électriques de niveaux de tension inférieure. On appelle ces nouveaux producteurs par plusieurs noms comme Production Décentralisée, Production Distribuée, Génération d'Énergie Distribuée ou Génération d'Énergie Dispersée (GED), etc., pour définir les sources d'énergie électrique alternatives de la production centralisée qui sont placées près des points de consommation et disposées des puissances installée allant de moins d'un kW à 50 MW.

### 2.4.2 Les avantages de la production décentralisée de l'énergie

Le développement de la PD est désormais une réalité dans la plupart des réseaux du monde. La déréglementation du marché de l'énergie ainsi que les évolutions technologiques des moyens de production de petite puissance ont considérablement encouragé cette mutation. Les raisons techniques et économiques, à la base du développement de ce type de production, sont entre autres [24]:

- La disponibilité d'une technologie actuelle offrant les garanties de fiabilité pour des unités de 100 kW à 150 MW
- La production qui peut être réalisée à proximité de son utilisateur, de manière à réduire les frais de transport de l'électricité, et quelquefois moins de pertes électriques

- Les rendements énergétiques élevés qui permettent une réduction des frais de fonctionnement
- L'épuisement de ressources fossiles (pétrole, charbon, etc.).
- Les sites pour une production de puissance réduite sont plus faciles à trouver car les politiques des états existent pour promouvoir les énergies renouvelables afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub>.
- Les moyens de production décentralisée raccourcissent les temps d'installation.
- La cogénération, une des formes de GED la plus répandue, améliore le rendement énergétique.

D'un autre côté, on peut envisager d'utiliser ces GED dans le cas d'incidents majeurs pour réalimenter par poches un certain nombre de consommateurs au niveau de la distribution sans attendre la remise sous tension venant du transport. Or, les GED sont actuellement considérées, par le gestionnaire du réseau, comme des sources marginales ou de secours qui devraient être déconnectées en cas d'incidents même légers.

D'ailleurs, la préoccupation accordée à l'aspect environnemental et au développement durable a encouragé les producteurs à développer la production décentralisée d'électricité sur la base des énergies nouvelles et renouvelables et des solutions de à haut rendement énergétique, ce qui favorisent l'introduction des nombreux producteurs de taille petite ou moyenne aux réseaux électriques aux niveaux de tension inférieure au cours de ces dernières années.

### 2.4.3 Les types de GED

Les productions décentralisées (GED) sont généralement liées aux énergies renouvelables, telles que l'éolienne, l'énergie solaire ou l'hydraulique; le type d'énergie primaire peut déterminer les caractéristiques de la PD raccordée dans le réseau public. Les technologies pour les productions décentralisées sont actuellement réparties dans deux groupes : sources conventionnelles et sources nouvelles et renouvelables; les sources conventionnelles les plus utilisées sont les suivantes:

- ❖ Les turbines à combustion (puissance disponible sur le marché de 25 kW à 200 MW), les micro-turbines à combustion (de 30 à 250 kW), les moteur à gaz (de 5 kW à 5MW), les moteurs diesel (de 100 kW à 25 MW), les moteur Stirling (de 5 à 50 kW). La première utilisation de ces sources est comme unités de secours. Les sources utilisant l'énergie primaire d'origine fossile ci-dessus citées fournissent l'énergie électrique et perdent toute la chaleur produite. L'idée est de récupérer cette énergie thermique pour la fournir à des charges thermiques (chauffages, séchage, eau chaude) afin d'améliorer le rendement

énergétique (qui peut atteindre 80 à 90%). La cogénération est donc une solution technique très intéressante, notamment lorsqu'elle se trouve proche des points de consommation électrique et thermique.

- ❖ *Les piles à combustibles* (de 1 kW à 1 MW selon le type de pile à combustible). Leurs technologies sont encore dans l'étape de recherche et de développement. Les sources nouvelles et renouvelables expérimentées sont :
- ❖ *Les turbines éoliennes* : Deux technologies utilisées principalement sont les générateurs synchrones et asynchrones. En fonction de la technologie choisie, leur raccordement au réseau se fait soit directement, soit via des interfaces d'électronique de puissance. En tenant compte de l'intermittence de ce type d'énergie, les turbines éoliennes sont normalement associées avec un système de stockage d'énergie et/ou avec un moteur diesel. La puissance d'un parc éolien varie actuellement entre quelques MW à 200 MW environ. On espère qu'avec l'arrivée à la maturité des technologies, des parcs éoliens de capacité plus grande pourront apparaître dans le futur.
- ❖ *Les petites centrales hydroélectriques* : L'utilisation de l'énergie hydraulique pour la production électrique et leur application au niveau de la production centralisée sont bien connues depuis longtemps. Il s'agit, ici, de centrales à petite échelle proche des clients comme des sources locales. Le niveau de puissance va de quelques kW à quelques MW.
- ❖ *La biomasse* : Elle fonctionne comme un générateur de type thermique en utilisant des combustibles issus de : bois, biogaz, déchets industriels et domestiques. La puissance de sortie peut aller à plus de 100 MW.
- ❖ *Les panneaux photovoltaïques* : Les panneaux photovoltaïques peuvent fournir une puissance de sortie de 1 à 2 kW par panneau. Ils sont raccordés au réseau via une interface d'électronique de puissance. Ces unités de génération, dont l'énergie vient de l'irradiation solaire, sont également caractérisées par l'intermittence de cette source primaire. Ainsi, il faut les associer avec un système de stockage.
- ❖ *Les systèmes de stockage*: Comme on ne peut pas stocker l'énergie électrique en grande quantité, on essaie de la stocker sous d'autres formes telles que l'énergie gravitationnel, le thermique, électrostatique ou électromagnétique. Leurs applications sont donc nombreuses : les centrales à base de batteries, le système de stockage à air comprimé, les volants d'inertie...etc. Pourtant, seules les centrales à base de batteries sont mises en exploitation à petite échelle comme les sources de secours, les autres technologies restent encore dans l'étape de recherche et développement.
- ❖ *La géothermie*: les centrales géothermiques utilisent l'énergie de nappes d'eau chaudes souterraines dans les zones les plus favorables (comme l'Islande, par exemple). Cette eau

chaude est pompée vers la surface pour passer dans des échangeurs et la vapeur produite est turbinée dans une installation thermique classique.

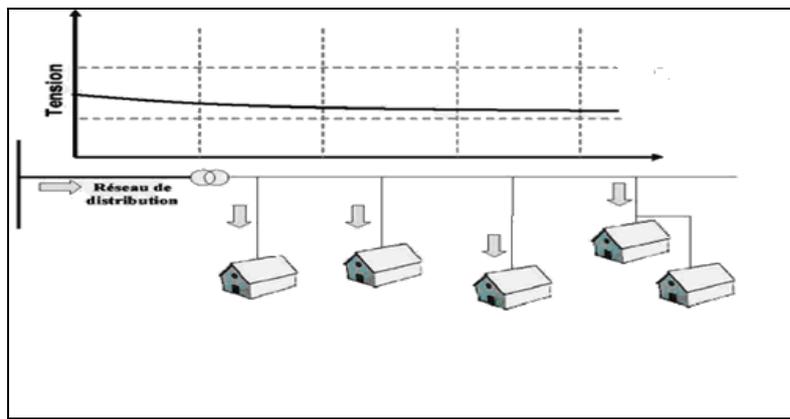
- ❖ *L'hydrolienne*: Les centrales hydroliennes utilisent l'énergie cinétique des courants marins de façon similaire aux éoliennes avec le vent. Elles restent encore dans l'étape de recherche et développement. Des projets d'implantation existent, mais cherchent encore des financements [25].
- ❖ *Cogénération*: production simultanée de deux formes d'énergie différentes dans la même centrale. Le cas le plus fréquent est la production d'électricité et de chaleur utile, la chaleur étant issue de la production électrique. Plus généralement, un co-générateur valorise une forme d'énergie habituellement considérée comme un déchet et inexploitée. L'idée de cogénération repose sur le fait que la production électrique dégage une grande quantité de chaleur à température moyenne, habituellement dissipée dans l'environnement. En réponse à une demande thermique (chauffage, eau chaude sanitaire, processus industriel, etc.), elle propose de valoriser la chaleur du cycle de génération électrique comme source thermique [23].

Il y a aussi des types de GED utilisant les énergies renouvelables tels que l'énergie biomasse, la micro-hydraulique, la géothermie et les énergies marines. Ils seront amenés à représenter une part de plus en plus importante des énergies produites dans le système électrique pour atteindre l'objectif de réduction des énergies fossiles [23].

## 2.5 Impacts des générateurs d'énergie dispersée sur la tension

Le raccordement des producteurs décentralisés sur le réseau public est un sujet dont l'importance a considérablement augmenté ces dernières années. La production décentralisée s'inscrit actuellement sur le fond de développement durable, avec utilisation rationnelle des énergies renouvelables.

Dans les réseaux BT, le transit d'énergie s'écoule dans un seul sens, des transformateurs MT/BT vers les consommateurs. La tension et le courant sont maximaux en tête de départ BT, et minimaux en bout de la ligne (Fig. 2.7).



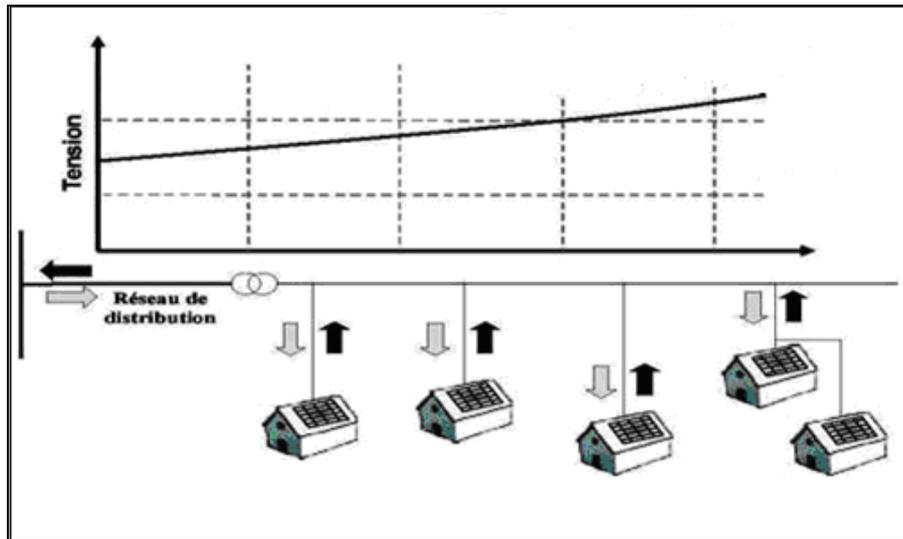
**Fig. 2.7** Tension le long d'une ligne sans installations photovoltaïques [26].

La compensation partielle est l'insertion des systèmes photovoltaïques chez les abonnés. Cette méthode consiste à insérer des systèmes photovoltaïques chez les abonnés BT là où la chute de tension est inadmissible. Ainsi, chaque client va produire de l'énergie en adéquation à son besoin, l'apport significatif de telle production est de réduire le courant transité sur la ligne et par conséquent réduire la chute de tension. L'insertion des systèmes photovoltaïques est proportionnelle à l'amélioration de la tension.

Les variations de tension d'un réseau électrique dépendent des caractéristiques de ce réseau ainsi que du nombre et de la nature des installations électriques raccordées à ce réseau. Les installations consommatrices d'énergie auront tendance à provoquer des baisses de tension alors que les installations de production auront tendance à générer des hausses de tension. Ces élévations de tension seront d'autant plus notables qu'il y aura beaucoup de SPV et peu de charges (**Fig. 2.8**) [26].

Dans le cas de forte densité d'installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique, les effets sur ce réseau peuvent se cumuler et conduire à des dépassements de certains seuils.

La densité de puissance PV installée au  $\text{km}^2$  n'est pas suffisante comme critère pour définir le taux de pénétration maximal de l'énergie PV sur un réseau, on doit tenir compte également des capacités du réseau (impédance des câbles) [26].



**Fig. 2.8** Tension le long d'une ligne avec injection d'électricité photovoltaïque [26].

Une étude d'EDF (électricité de France) a montré que la production décentralisée génère une augmentation des pertes dans les réseaux de distribution; mais lorsque l'on s'intéresse uniquement à la part du PV dans ce résultat, on peut en déduire que globalement [26]:

- Les fermes PV de plusieurs MW, généralement raccordées à partir de départs HT dédiés, conduiraient à une augmentation des pertes.
- Les installations PV de type résidentiel, plus proches des lieux de consommation, permettraient de réduire les pertes.

L'explication est simple: les fermes PV de plusieurs MW nécessitent des constructions de nouveaux ouvrages (départs dédiés) et augmentent ainsi la longueur totale de lignes électriques. L'étude montre que la quantité de pertes générée dans ces nouveaux ouvrages est supérieure à la réduction des pertes au niveau du poste source. Le bilan conduit donc à une augmentation globale des pertes pour le réseau.

Au contraire, l'énergie produite par le PV résidentiel étant consommée quasiment sur place, elle contribue à réduire le transit d'énergie dans les réseaux BT et donc à diminuer les pertes [26].

La connexion de la GED sur le réseau de distribution modifie le plan de tension. La modification du plan de tension provient du fait que le transit de puissance est modifié. Le profil de tension dépend principalement de [19]:

- La configuration du réseau
- L'état de charge du réseau
- Type de GED - de la puissance des GED

- Système de régulation des GED
- Lieu de connexion de GED

## 2.6 Optimisation de fonctionnement de la production décentralisée

La multiplication et la diversité des nouveaux générateurs dispersés dans le réseau de distribution nécessitent d'optimiser le fonctionnement de tous ces moyens. Les problèmes d'optimisation de fonctionnement d'un réseau incluant les GED sont [19] :

- Minimisation des couts de production des GED
- Minimisation des pertes grâce à la GED
- Détermination de l'emplacement optimum de la GED
- Amélioration (optimisation) de stabilité du réseau par GED
- Amélioration (optimisation) du plan de tension par GED

Ces problèmes consistent à déterminer les lieux et la quantité des GED afin d'optimiser les fonctions objectives ci-dessus en respectant les contraintes de sécurité.

## 2.7 Les GED et l'électrification rurale

Dans le monde rural, l'électrification est considérée comme un puissant facteur de développement socio-économique. En effet, par sa facilité d'utilisation, celle-ci contribue à l'amélioration de la qualité de vie des populations qui en bénéficient. De nombreux retours d'expériences montrent des améliorations très sensibles dans les conditions de vie des populations bénéficiaires puisque l'électrification permet dans une certaine mesure :

- Un meilleur accès à l'éducation : éclairage et audiovisuel dans les maisons et les écoles.
- Une amélioration des conditions sanitaires impactant positivement sur la santé des populations en raison de:
  - La limitation de l'utilisation de la biomasse au sein du foyer qui aggrave considérablement les pollutions domestiques (infections respiratoires infantiles, maladies pulmonaires, etc.) du fait d'un taux d'émission élevé (CO<sub>2</sub>, CO, etc.) et d'une aération en générale insuffisante.
  - La mise en place de réfrigérateurs pour conserver les vaccins ou certains médicaments.
  - L'utilisation de pompes et de purificateurs d'eau.
  - Un accroissement de l'activité économique des villages concernés permettant de limiter l'exode rural et la désertification.
  - Une amélioration des problèmes liés au manque de nourriture et à la malnutrition grâce à une augmentation des rendements de l'agriculture apportée par la possibilité d'irriguer (petites pompes).

• Le gain de temps apporté par l'utilisation de l'électricité peut être utilisé pour d'autres activités productives améliorant ainsi le niveau de vie des populations.

➤ *Electrification décentralisée*

Il existe une solution complémentaire à l'électrification rurale centralisée; il s'agit de l'électrification Rurale Décentralisée, solution adaptée à l'électrification de sites isolés (loin d'un réseau préexistant). Cette solution peut toutefois être complémentaire à des programmes d'extension du réseau interconnecté, dans le temps (pré-électrification pour les zones où la demande est encore trop faible) et dans l'espace (micro-électrification dans les zones isolées). Ces solutions sont pour l'instant particulièrement mises en œuvre pour des sites insulaires et sont la plupart du temps basées sur les systèmes hybrides de production utilisant les énergies renouvelables et les groupes électrogènes. Les charges desservies sont en général peu consommatrices d'énergie (Lampes Basse Consommation) ce qui permet de réaliser des économies substantielles sur le dimensionnement du système de production en limitant la puissance de pointe. Le dimensionnement d'un tel système est réalisé de manière à minimiser le coût de production de l'électricité, de s'assurer que la charge est desservie selon un certain critère de sûreté, et de minimiser l'énergie dissipée dans le réseau. Certaines données de bases sont nécessaires à ce dimensionnement telles que la variation moyenne de charge sur une journée, et les ressources énergétiques de types renouvelables (éolien, solaire, hydraulique). Pour cela, des mesures sur le terrain sont nécessaires (radiation solaire moyenne, vitesse du vent, débit d'eau, etc. [27]).

## 2.8 Conclusion

A travers ce chapitre, on a entamé plusieurs notions sur le réseau électrique, puis sur les GED, ensuite on a présenté l'impact d'insertion des GED sur la tension du réseau électrique. Sachant que ce principe favorise le choix d'utilisation des énergies renouvelables pour la production d'électricité. Notre but était de présenter une base théorique sur la solution choisie dans notre travail pour traiter la problématique détaillée dans le suivant chapitre.

# Chapitre 3

Amélioration de la  
tension dans les  
réseaux BT avec les  
systèmes PV

### 3.1 Introduction

La disponibilité de l'énergie à tout instant est un facteur important pour le développement et l'amélioration des conditions de vie de la population. La qualité de cette énergie est aussi importante que sa disponibilité. Ces deux facteurs sont hautement exigés.

La production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable comme la conversion photovoltaïque est en constante progression. Pour répondre à tous les besoins en électricité, la production est de plus en plus amenée à être décentralisée.

Le bon fonctionnement d'un réseau électrique est conditionné par le respect de contraintes, qui peuvent être d'ordre physique ou réglementaire. Ainsi, la tension doit rester dans une plage des valeurs pour laquelle les constituants du réseau ont été dimensionnés. Le distributeur est généralement tenu contractuellement de respecter une certaine plage de variation de la tension autour de la valeur nominale. Pour les réseaux BT des régions rurales, la chute de tension devient inacceptable, quand elle excède 10 % de la tension nominale. Et dans ce cas-ci, l'amélioration de la tension au bout de réseau est l'une des préoccupations majeures du distributeur. Ce dernier procède à de différentes techniques telles que: le renforcement des sections des conducteurs, l'installation de nouveaux postes de transformateurs MT/BT.

On a vu dans le chapitre précédent que la qualité de la tension est affectée par la distance entre la source d'énergie électrique et la charge, la production photovoltaïque raccordée sur des charges BT, dans les lieux mal desservies est l'une des solutions typiques pour ce problème. Les systèmes photovoltaïques peuvent donc contribuer à cette solution puisqu'elles génèrent de l'énergie à l'endroit du déficit. L'installation des systèmes photovoltaïques (SPV) raccordées au réseau électrique, est une des solutions de plus en plus utilisées pour résoudre ce problème en produisant l'énergie électrique à l'endroit du déficit (bout de réseau), et en permettant de fournir, de la même occasion, une énergie électrique propre.

Dans ce chapitre, nous allons présenter une étude de simulation sur l'effet de connecter des mini-systèmes photovoltaïques au réseau électrique BT, et des centrales PV aux réseaux électriques MT. Notre étude est basée sur un cas réel de problème de chute de tension qui touche une zone rurale située au nord Algérien exactement dans la wilaya de Chlef.

### 3.2 Présentation générale de la méthodologie de travail:

Le but de ce travail est de résoudre un problème de chute de tension qui touche une vaste zone rurale située au sud-est de la wilaya de Chlef (El karimia). Pour résoudre ce problème, on propose l'utilisation d'une nouvelle solution qui s'appelle Génération d'Énergie Distribuée ou Génération d'Énergie Dispersée. Sachant que la distribution de l'énergie électrique pour ces

populations rurales à cause de l'isolement et du relief difficile, souffre de problèmes de chute de tension; toutefois la satisfaction de la demande d'électricité pour la liaison au réseau national se heurte à plusieurs difficultés: la faible densité et la dispersion de la population, la faiblesse des revenus, alors il est nécessaire d'explorer de nouvelles solutions possibles, comme l'exploitation du potentiel solaire abondant dont disposent ces zones, pour l'application de cette solution sur notre cas, on va suivre deux méthodes différentes:

- La première méthode, propose l'insertion des centrales PV connectés au réseau électriques MT
- La seconde, est basée sur la connexion des mini-centrales PV aux réseaux électriques BT.

Notre but sera de trouver la solution optimale pour corriger les chutes de tension enregistrées chez les habitants de cette zone isolée surtout durant la période estivale où la consommation sera maximale. Pour la réalisation de ce travail l'outil informatique de simulation choisi est JPléc.

Pour mieux comprendre la problématique de notre travail, on a commencé par une présentation de la situation d'énergie électrique du district de Chlef, ensuite en utilisant le logiciel JPléc, on a simulé les profils des tensions au long des réseaux BT, qui alimentent les habitants du site étudié.

Pour justifier la solution choisie (utilisation des systèmes PV), on est intéressé à la présentation du gisement solaire important que caractérise notre site.

### **3.3 Situation électrique au district de Chlef**

La distribution d'énergie électrique dans le district de Chlef subit de fréquentes coupures de courant, notamment en période estivale, caractérisée par une forte augmentation de l'utilisation de l'énergie électrique et un grand nombre de travaux de maintenance. La figure 3.1 montre l'évolution de l'énergie électrique au cours de la période 2007–2012. Comme indiqué, l'énergie électrique fournie au district de Chlef est passée de 689 GWh en 2007 à 997 GWh en 2012 et la consommation d'énergie électrique est passée de 517 GWh en 2007 à 757 GWh en 2012. Les pertes en électricité augmentent de 172 GWh en 2007 à 240 GWh en 2012. Ainsi, le taux de perte d'énergie électrique a varié entre 24% et 25% entre 2007 et 2012 [28].

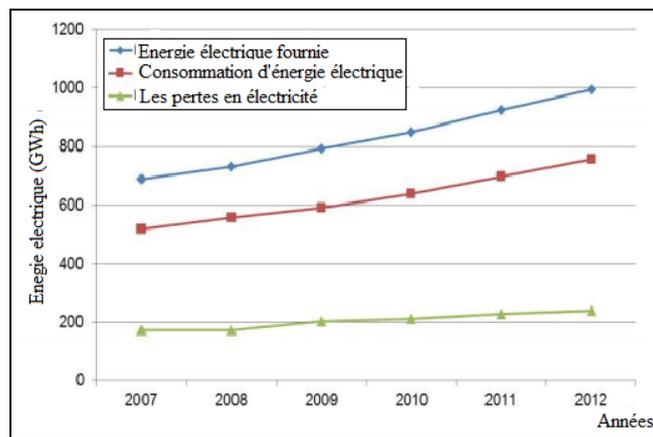


Fig. 3.1 Evolution de l'énergie électrique au district de Chlef [28].

### 3.4 Présentation du réseau étudié

Le réseau concerné dans notre étude, se compose d'une longue ligne dorsale MT; connectée avec 13 dérivation BT, chaque dérivation est connectée avec un réseau BT par un transformateur MT/BT (Tab. 3.1). Les réseaux sont utilisés pour alimenter des charges isolés. Les clients raccordés avec ce réseau sont mal alimentés (les résultats de simulation montrent que des clients au bout des réseaux BT sont alimentés avec une tension moins de 100V dans les heures de pointe) vu la longueur importante de ligne et l'éloignement de la source (de dorsale). La tension écrasée en période d'été se traduit par un manque à gagner pour le fournisseur, les activités quotidiennes sont perturbées et les abonnés ne peuvent plus utiliser leurs équipements de ménages (climatiseur, télévision ... etc.).

Les caractéristiques générales du réseau étudié sont illustrées dans le tableau suivant:

Tab. 3.1 Caractéristiques générales du réseau étudié

Longueur totale de la ligne MT	61.21 km
Longueur de la ligne dorsale MT	41.26 km
Nombre de dérivation MT	13
Longueur de dérivation MT	entre 1.43 et 3 km
Nombre de poste MT/BT	14
Nombre de réseaux BT	14
Longueur de réseau BT	entre 1.45 et 2.48 km
Puissance apparente nominale du poste HT/MT	45 MVA
Puissance apparente nominale du poste MT/BT	4 MVA

La structure du réseau étudié est présentée dans le schéma suivant :

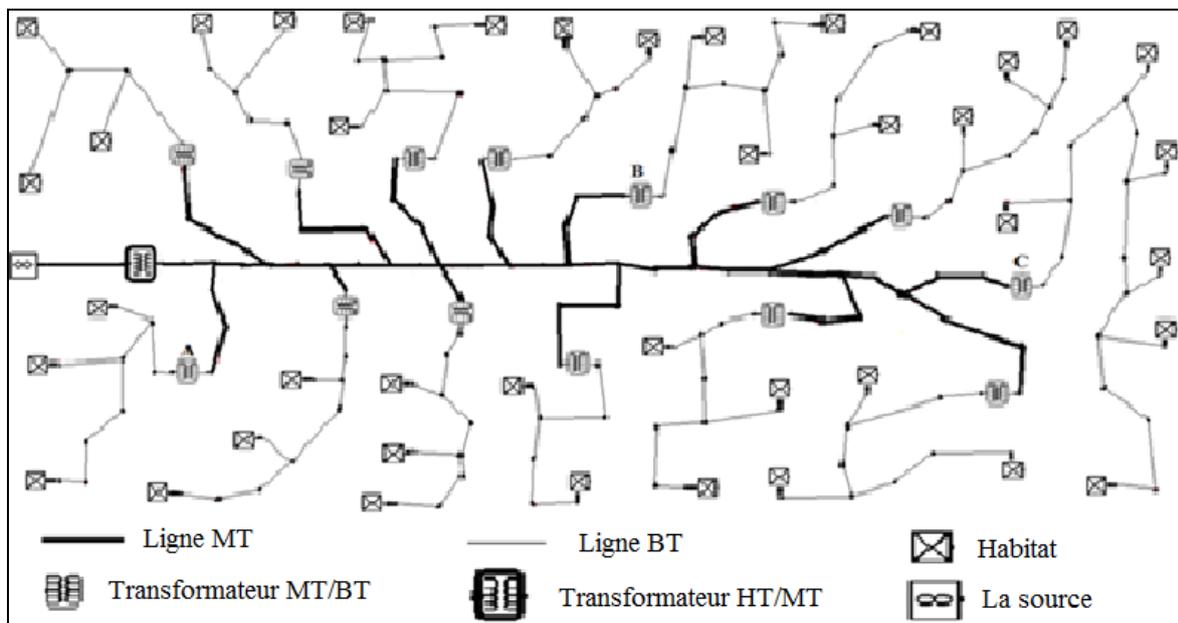


Fig. 3.2 Schéma du réseau étudié.

### 3.5 Profil de consommation

Dans les études qui traitent ce type de problématiques, la connaissance du profil de consommation est très importante. Dans ce contexte, nous allons nous intéresser à la présentation de l'évolution de la consommation annuelle d'un abonné BT de la ligne en question, illustrée sur la figure (3.3) pour l'année 2016. Ainsi, l'histogramme montre la nette augmentation de la consommation électrique durant la période d'été (3<sup>ème</sup> trimestre).

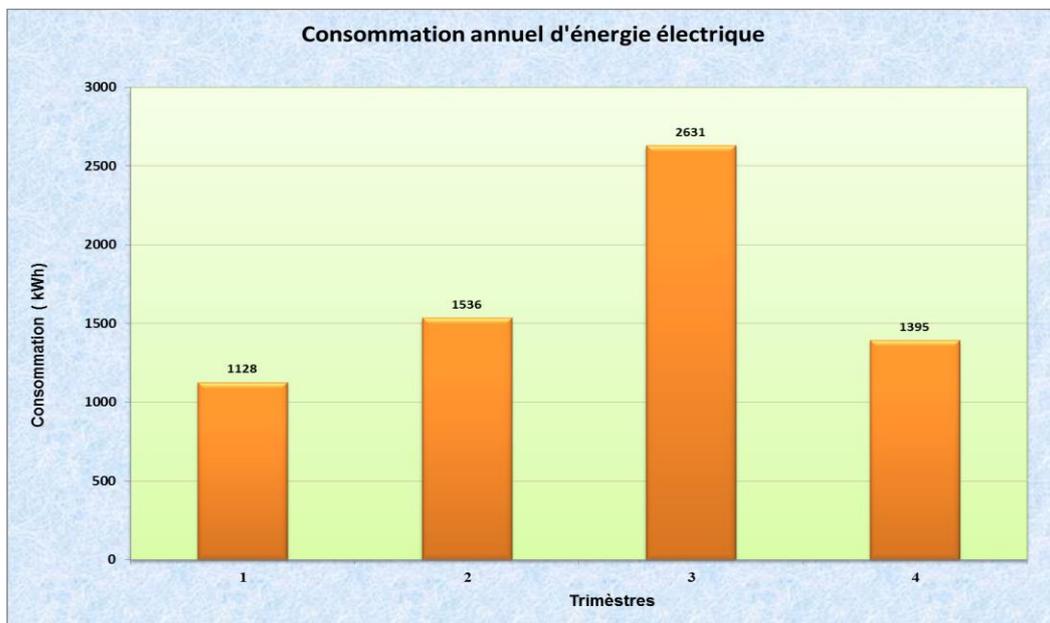
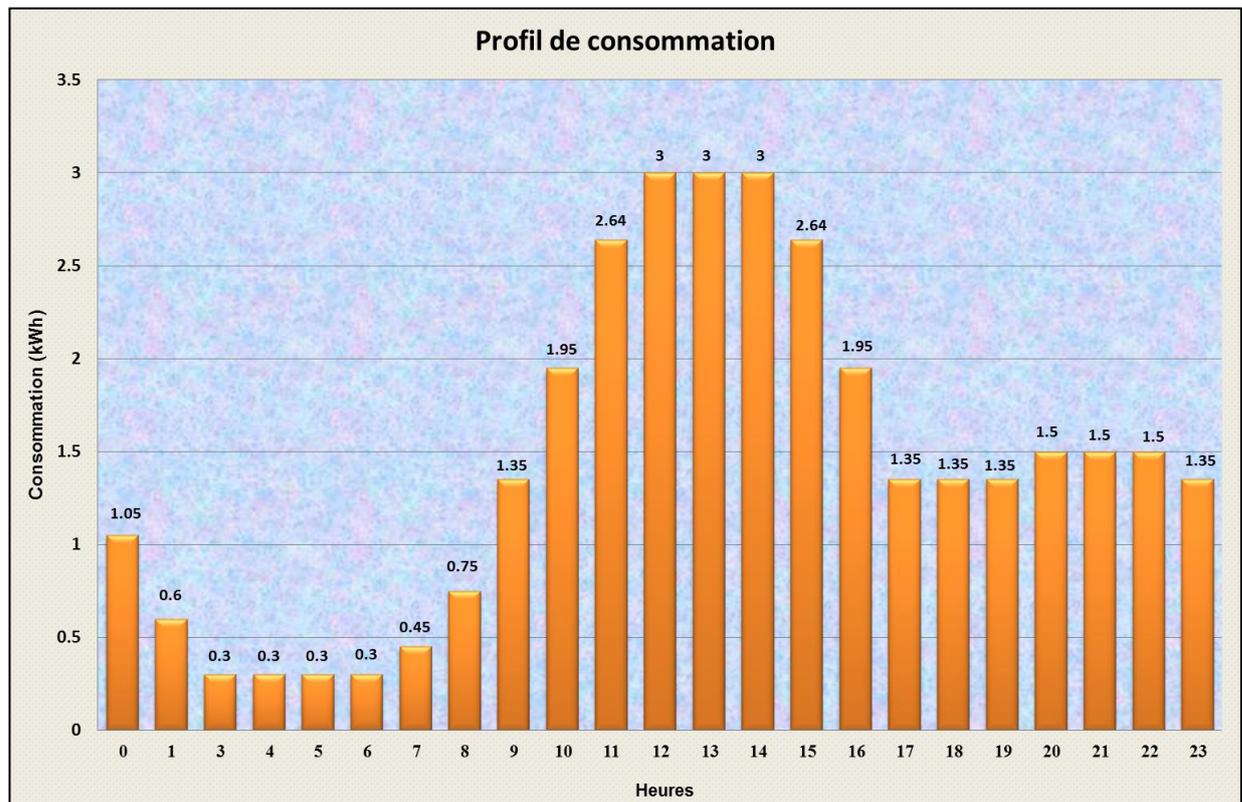


Fig. 3.3 Profil de consommation énergétique trimestriel d'un abonné pour l'année 2016.

La figure (3.4) donne un exemple sur la courbe de charge horaire typique que nous avons mesurée chez un abonné BT du site étudié, concernant une journée type de la période estivale de l'année 2016. Ainsi, ces résultats montrent que le profil de charge est très variable et non régulier avec une pointe qui se situe à 3 kW entre 12<sup>h</sup> et 14<sup>h</sup>. Cette pointe de consommation est due à l'utilisation de la climatisation durant cette période caniculaire de la journée.



**Fig. 3.4** Consommation énergétique horaire d'une journée type du mois d'août d'un abonné au site étudié.

### 3.6 Outil informatique

Dans notre étude, l'outil de simulation choisi est le logiciel JPélec. L'objectif de ce logiciel est de mener des calculs des différentes grandeurs tensions, courants, puissances actives, et réactives pour chacun des composants du réseau. Les calculs s'effectuent en régime permanent sur un réseau triphasé équilibré, qu'il soit maillé (réseau de transport) ou pas (réseau de distribution). JPélec se présente sous la forme d'un exécutable complètement autonome. L'interface graphique est conviviale et très simple pour l'utilisation. Les choix effectués concernant les modèles implémentés et les valeurs par défaut des paramètres, ont eu pour objectifs :

- D'une part une prise en main aisée et rapide.

- D'autre part une bonne adéquation entre les besoins de l'utilisateur en termes de précision et de simulation, et les informations qu'il est en mesure d'avoir ou d'obtenir sur le réseau et ses composants.

Grace à un projet de coopération européen intitulé «*Cost efficient and reliable rural electrification schemes for South Mediterranean countries based on multi user Solar Hybrid grids (CRESMED)*» où le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, Algérie) et l'Ecole des Mines de Paris (ARMINE, France) sont partenaires dans ce projet, nous avons obtenu la dernière version de ce logiciel JPélec. Cette version, contrairement à la première version, possède une bibliothèque de composants Energies Renouvelables / Production Décentralisée:

- Champ photovoltaïque, ferme éolienne, groupe électrogène et batteries.
- Un module météorologique pour le calcul de l'irradiation horaire sur un plan incliné en fonction d'informations générales sur le site (position géographique et albédo) et de la date.

En plus, ce logiciel permet :

- ✓ *La saisie d'un réseau à partir d'une feuille graphique et d'une boîte de composants*: la construction du réseau se fait en déposant les symboles électriques sur la feuille graphique et en les reliant entre eux à l'aide de connexions sans impédance. Les caractéristiques des différents éléments sont alors fournies par l'intermédiaire de boîtes de dialogue.
- ✓ *Le calcul de répartition des flux de puissance*: la possibilité est donnée de simuler un unique point de fonctionnement ou alors une journée divisée en 24 points horaires.
- ✓ *La visualisation des résultats*: les résultats de simulation sont directement affichés sur la feuille graphique: les tensions en chaque nœud (valeur efficace et phase), les courants dans chaque ligne ainsi que les flux de puissances active et réactive peuvent être visualisés ou masqués, au choix de l'utilisateur. Dans le cas d'une simulation sur 24h, les résultats apparaissent sous forme de courbes dans la feuille graphique, mais aussi dans le fichier de résultats (RESULTS\_24H.txt) sous forme de tableaux donnant pour chaque composant et à chaque heure les puissances, courants et tensions.

La première version a été développée par Supélec. Elle proposait l'interface graphique actuelle avec les composants standards d'étude des réseaux électriques et réalisait un calcul de régime permanent sur un point horaire.

En 2006, une évolution de ce logiciel, permet d'incorporer une bibliothèque de composants 'énergies renouvelables/production décentralisée' : champ photovoltaïque, ferme éolienne, groupe électrogène, batteries et bientôt centrale hydraulique. Un module 'météorologique' a été ajouté afin de calculer l'irradiation horaire sur plan incliné en fonction d'informations générales

sur le site (position géographique et albédo) et de la date. Enfin, cette nouvelle version autorise la prise en compte de plans de production et de profils de consommation sur 24h, et affiche les résultats sous forme de courbes dans la fenêtre principale [29].

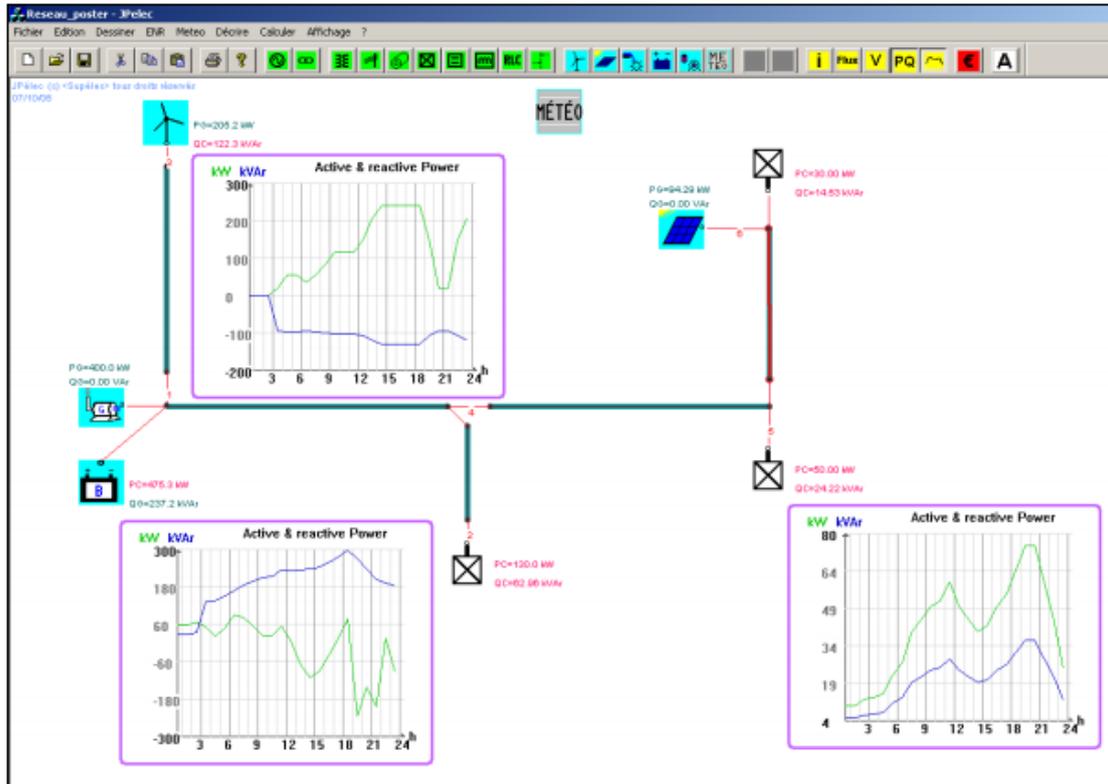


Fig. 3.5. Fenêtre graphique avec courbes de puissances affichées [29].

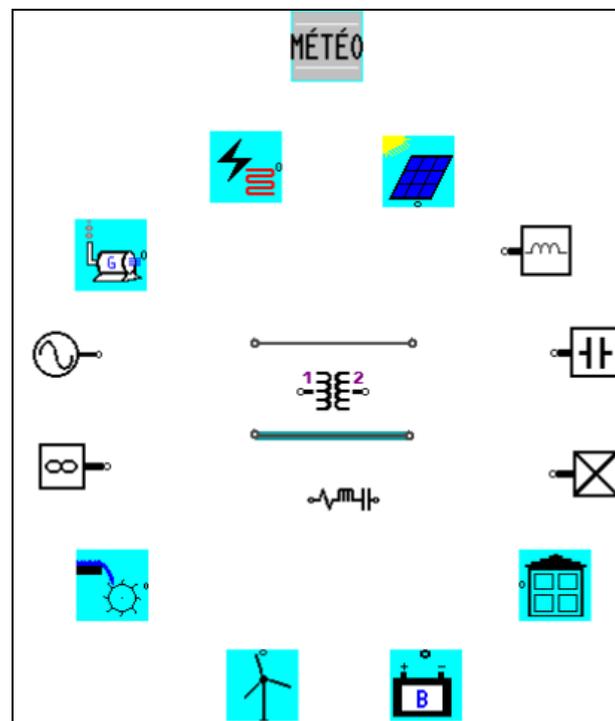
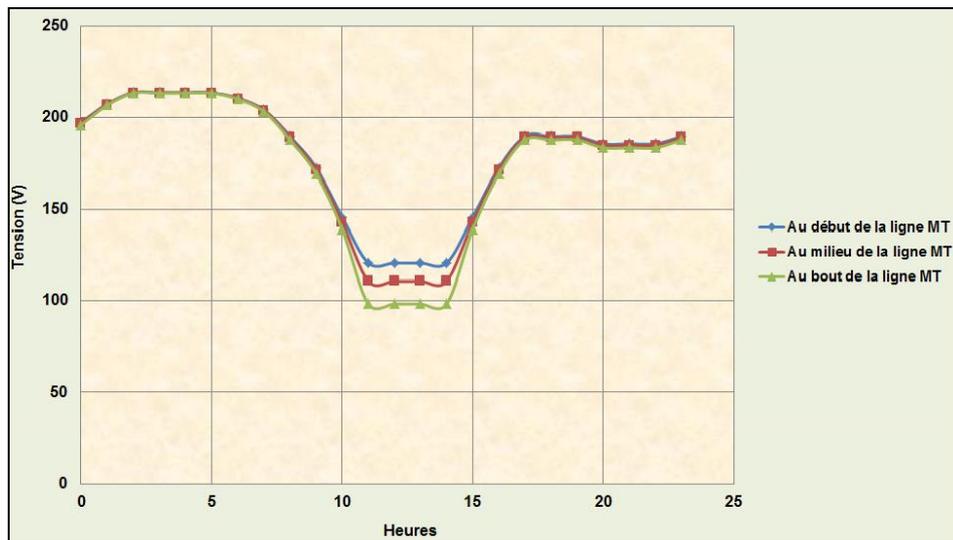


Fig. 3.6 Les composants: énergies renouvelables/réseaux traditionnels disponible chez le logiciel JPléc[29].

### 3.7 Simulation des chutes de tension

Nous avons vu précédemment que pour les réseaux BT ruraux, la tolérance sur la chute de tension est fixée de 10% par le distributeur Algérien. A l'aide de la simulation utilisant le logiciel JPléc, nous avons calculé la tension horaire pour une journée type du mois d'août au bout de de trois réseaux BT: le premier est connecté au début de la ligne MT par le transformateur A, le deuxième au milieu de la ligne MT est connecté par le transformateur B, et le troisième au bout de la ligne MT est connecté par le transformateur C (voir fig. 3.2). L'allure de la tension horaire est illustrée dans la figure (3.7). La courbe montre que pour les trois nœuds, il existe une baisse de tension d'une manière remarquable lors des heures de pointe (11<sup>h</sup>-16<sup>h</sup>).



**Fig. 3.7** Tension horaire au bout de de trois réseaux BT étudiés.

Pour savoir s'il existe un dépassement de limite contractuel de la chute de tension (10%), on a utilisé les mêmes résultats précédents pour calculer la chute de tension horaire (Fig. 3.8). La chute de tension sera calculée en utilisant la formule suivante:

$$\text{Chute de tension (\%)} = [(220 - \text{tension}) / 220] \cdot 100 \quad (3.1)$$

Les résultats obtenues lors de la simulation montrent qu'il existe des chutes de tension qui sont très loin de la limite contractuelle pour les trois réseaux BT (cela veut dire tous les réseaux BT qui composent le réseau étudié), surtout pour les réseaux BT qui sont connectés au bout de la ligne MT (plus de 50%); ces chutes sont surtout remarquables lors des heures de pointe (11<sup>h</sup>-16<sup>h</sup>). Et dans ce cas les clients de ce réseau ne peuvent plus utiliser leur équipement électroménager. Donc le réseau étudié souffre d'un grand problème de chute de tension pour tous les 14 réseaux BT, connectés avec la ligne MT.

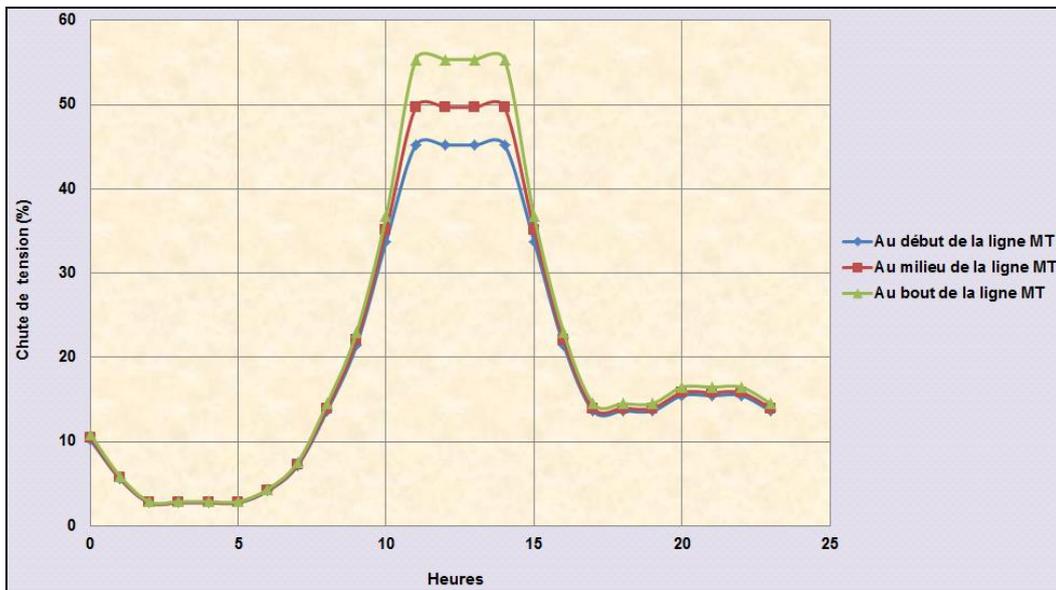


Fig. 3.8 Chute de tension horaire au bout des trois réseaux BT étudiés.

Maintenant, on va s'intéresser à localiser le lieu où la chute de tension commence à dépasser la limite admissible au long des réseaux BT. Pour cela nous allons calculer la chute de tension à 13<sup>h</sup> (heure de pointe) en fonction de la longueur de la ligne BT, ce travail est appliqué pour les trois réseaux BT précédents. Les résultats obtenus sont illustrés dans (Fig. 3.9)

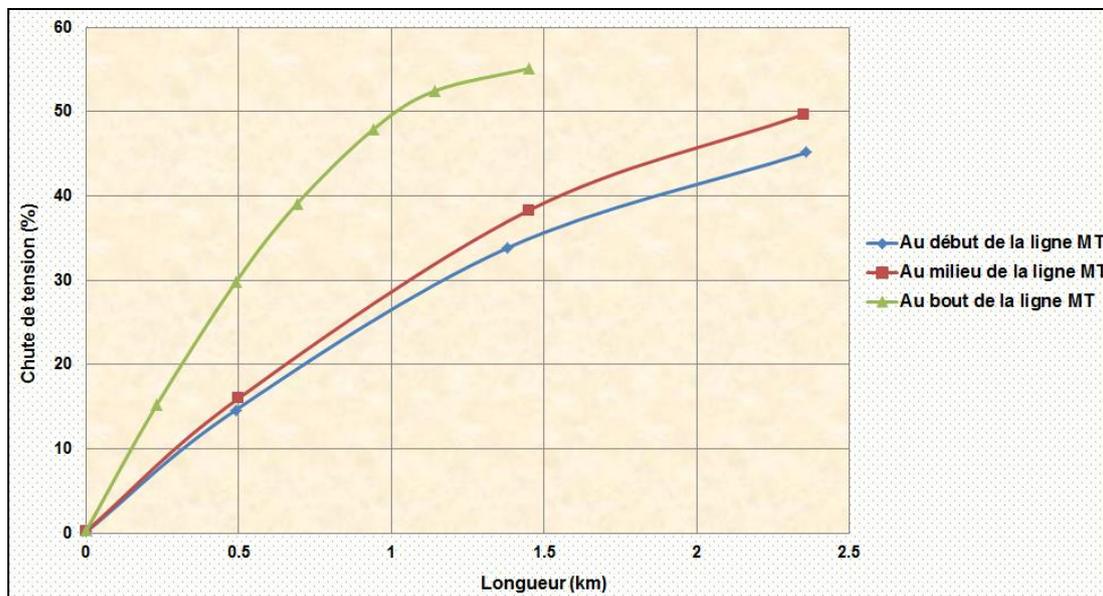
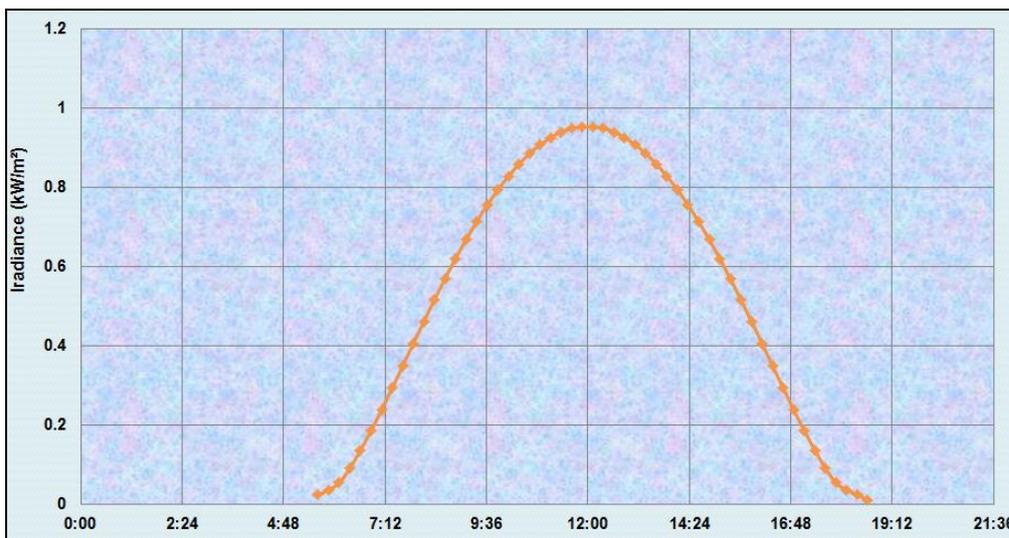


Fig. 3.9 Chute de tension à 13<sup>h</sup> (heure de pointe) en fonction de la longueur de la ligne BT

Ces courbes montrent que la chute de tension augmente avec l'éloignement aux postes MT/BT, surtout pour les réseaux BT qui sont très loin du poste source HT/MT, où elle arrive à des valeurs très loin de limite contractuelle (dépassé 50%); par conséquent une disfonctionnement des équipements électroménagers et les clients peuvent perdre ces équipements.

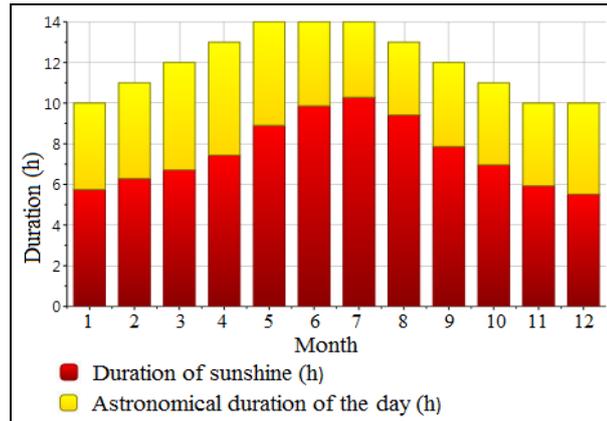
### 3.8 Gisement solaire:

L'énergie produite par un générateur PV dépend du rayonnement solaire reçu et de la température de la cellule, donc il est très important de connaître le gisement solaire reçu par le site étudié pour bien déterminer l'énergie produite par les systèmes PV. Dans ce contexte, nous allons nous intéresser dans cette partie de notre travail, à présenter l'énorme gisement solaire que reçoit notre site et ses caractéristiques, pour cela, on choisit l'utilisation de deux logiciels PV-GIS et meteonorm. En utilisant le logiciel PV-GIS, on a collecté les données concernant le gisement solaire du site intéressé. La figure (3.10) présente l'irradiance horaire reçue par un plan incliné à la latitude du lieu ( $36^\circ$ ) et orienté vers le sud dans le site intéressé pour une journée type du mois d'août. Cette figure montre que la puissance reçue est importante et maximum pendant les horaires de pointe de l'après-midi. Donc le site étudié reçoit une quantité d'énergie solaire importante au moment du pic de la consommation, ce qui favorise l'utilisation de ce type d'énergie pour résoudre le problème des clients de ce site.



**Fig. 3.10** Irradiation horaire concernant une journée type du mois d'août au site étudié reçu par un plan horizontal (<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php> Photovoltaic Geographical Information System (PV-GIS), Accès 23/05/2018).

Pour plus d'informations concernant le gisement solaire reçu par notre site, on va utiliser le logiciel méteonorm 7.0 pour présenter d'autres données intéressantes. Dans la figure 3.11 on présente la durée d'insolation avec la durée astronomique du jour, concernant une journée type pour chaque mois de l'année. D'après cette figure issue du logiciel méteonorm, on observe facilement que notre site bénéficie d'une durée d'insolation importante, où elle dépasse 10 heures durant presque huit mois de l'année; donc un important impact sur la production PV sur notre site.



**Fig. 3.11** Durée d'insolation concernant le site étudié

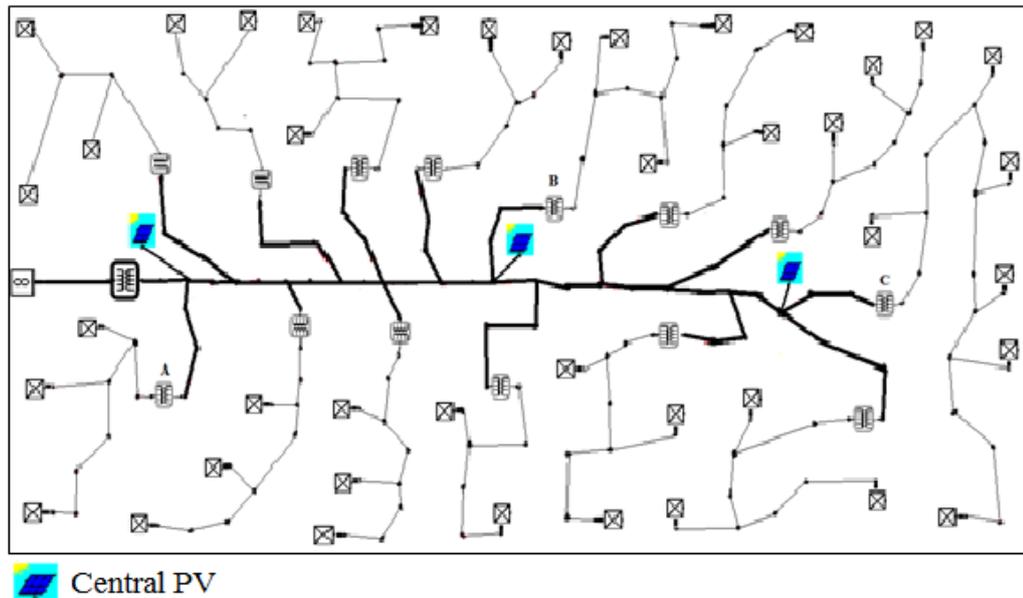
L'utilisation d'un système photovoltaïque pour la production de l'électricité sera de grande utilité puisque les contraintes apparaissent dans la période où l'ensoleillement est au maximum et par conséquent, la production électrique du générateur photovoltaïque sera maximale également.

### 3.9 Amélioration de la chute de tension

Les résultats de simulation montrent que la chute de tension dépasse la limite admissible, presque sur toute la totalité du réseau étudié. Pour réduire la chute de tension, l'apporter au-dessous de 10 %, nous allons suivre deux méthodes: la première est de connecter des centrales photovoltaïques de 150 kW<sub>c</sub> de puissance crête à ligne MT, la seconde est d'équiper les abonnés au bout des réseaux BT avec des mini-centrales PV de 5 kW<sub>c</sub> de puissance crête. Le but est de chercher la méthode optimale pour corriger la chute de tension.

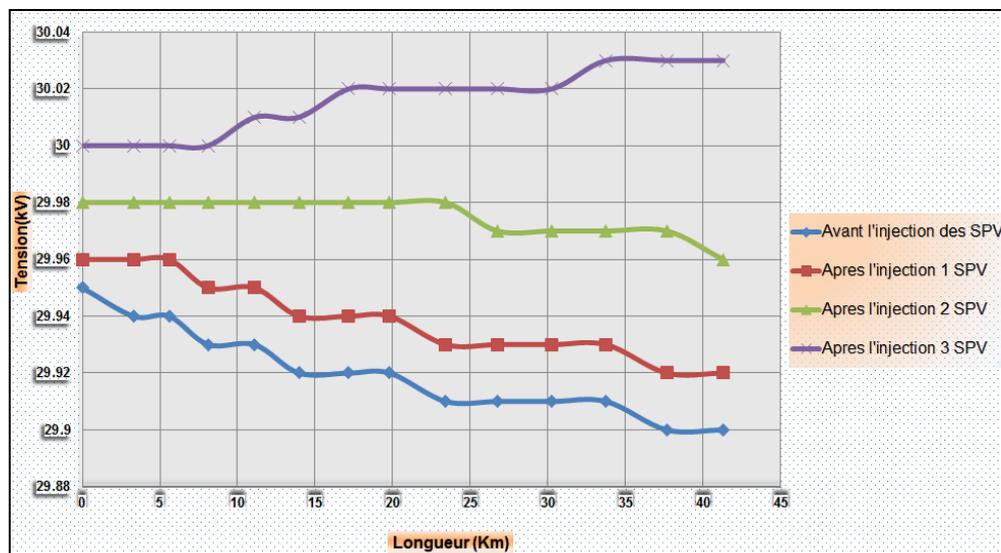
#### Méthode1: compensation utilisant des centrales PV connectées à la ligne MT:

On va essayer de corriger la chute de tension par connecter des centrales PV de puissance crête 150 kW<sub>c</sub> avec la ligne MT. On commence par installer une première centrale au début de la ligne MT, ensuite une autre au milieu, et enfin une troisième au bout de la ligne MT. L'emplacement des installations PV est déterminé dans la figure 3.12.



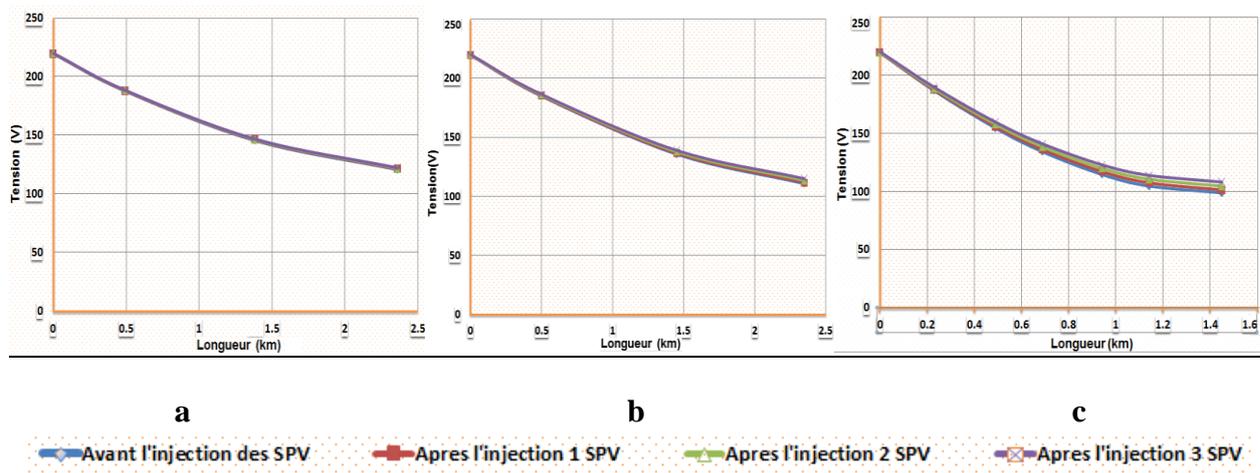
**Fig. 3.12** Positions des centrales PV connectés au réseau MT

Les centrales PV vont produire de l'énergie électrique et l'injecter au réseau MT, et elle sera ensuite transférée via un transformateur MT/BT vers les réseaux BT. Pour connaître l'impact de la connexion des systèmes PV sur la tension du réseau MT on va relever après chaque connexion la tension au long de ligne MT, les résultats de simulation sont présentés dans la figure 3.13.



**Fig. 3.13** Impact de la connexion des centrales PV sur la tension au long du réseau MT

Ainsi, pour déterminer l'impact de chaque connexion sur la tension des réseaux BT, on a relevé la tension au long des mêmes trois réseaux BT (connectés avec les transformateurs A, B, et C), les résultats de simulation sont présentés dans les figures 3.14 (a,b, et c).



**Fig. 3.14.a** Tension au long du réseau BT connecté au transformateur A.  
**Fig. 3.14.b** Tension au long du réseau BT connecté au transformateur B.  
**Fig. 3.14.c** Tension au long du réseau BT connecté au transformateur C.  
 (après chaque connexion d'une centrale PV avec le réseau MT)

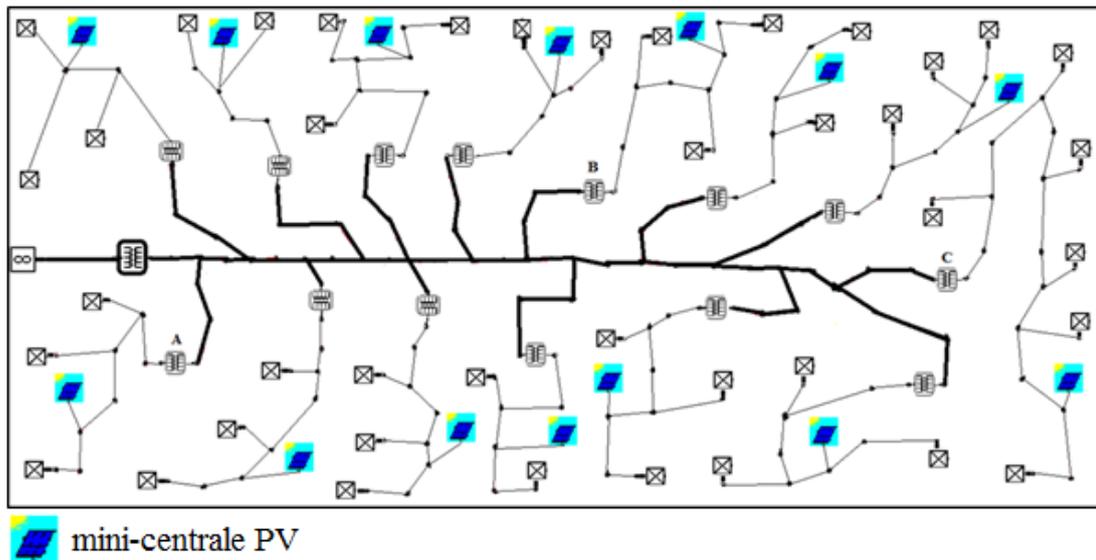
Discussion des résultats:

Concernant les résultats de la tension au long de ligne MT (présentés dans fig. 3.13) : avant l'installation des centrales PV, il existe une faible chute de tension remarquable au bout de la ligne MT; qui est due à l'éloignement de la source (plus de 40 km); sachant que la tension fournie par le poste HT/MT vers la ligne MT est 30 kV. Après chaque installation PV on observe une amélioration remarquable de la tension; après la connexion du 3<sup>ème</sup> centrale la tension de ligne MT dépasse celle fournie par le poste HT/MT, donc la ligne ne peut plus supporter la connexion d'un nouveau centrale pouvant provoquer un risque de surtension.

La figure 3.14 montre l'impact de connecter la ligne MT avec des centrales PV sur l'amélioration de la tension dans les réseaux BT. Les résultats obtenus montrent que même après l'installation du 3<sup>ème</sup> centrale, il n'existe aucune amélioration remarquable de la tension dans les réseaux BT. Donc, les centrales PV de puissance connectées aux réseaux MT peuvent améliorer la tension MT; mais ils n'ont aucun impact sur la tension des réseaux BT.

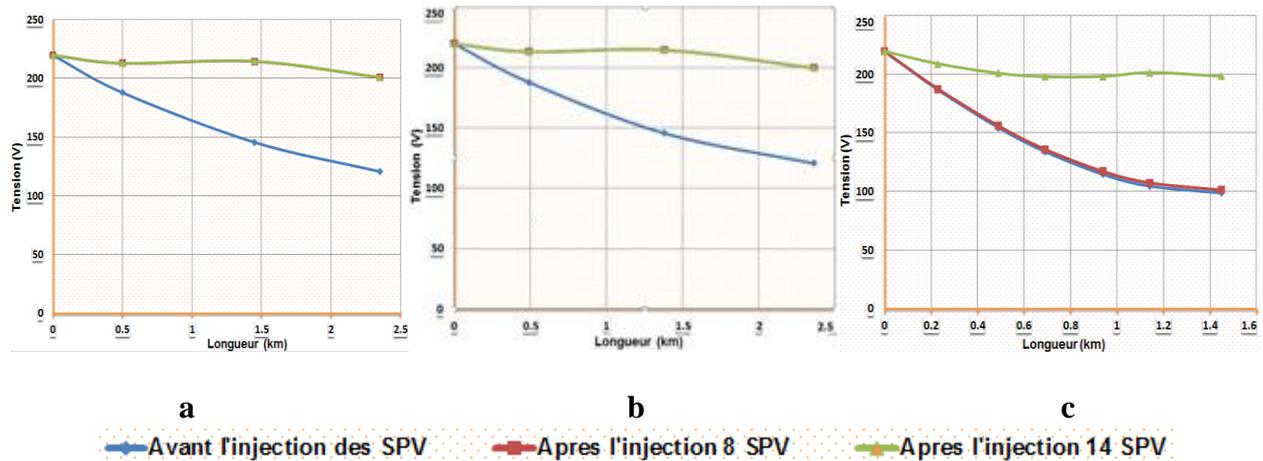
*Méthode 2: Compensation utilisant des mini-centrales PV connectées aux réseaux BT:*

La stratégie suivie dans cette méthode consiste à équiper les abonnés en bout des réseaux BT avec des mini-centrales PV de 5 kWc de puissance d'une manière successive (la connexion se fait au bout du réseau BT), et en commençant par les réseaux qui se trouvent au début de la ligne MT. La tension est relevée après chaque opération; l'opération d'équiper ces abonnés avec des SPV s'arrête lorsque la chute de la tension atteint une valeur admissible (< à 10%). L'emplacement des installations PV est déterminé dans le schéma suivant (fig. 3.15):



**Fig. 3.15** Schéma montrant l'emplacement des mini-centrales PV connectées aux réseaux électriques BT

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures 3.16 (a,b, et c). On est intéressé à présenter l'amélioration de la tension au long des même trois réseaux BT (A, B, et C) avant l'installation des SPV, après l'installation de 8 SPV, et après l'installation de 14 SPV (sans chute de tension). La simulation est arrêtée lorsque la chute de tension est devenue admissible pour tous les clients de ce réseau.



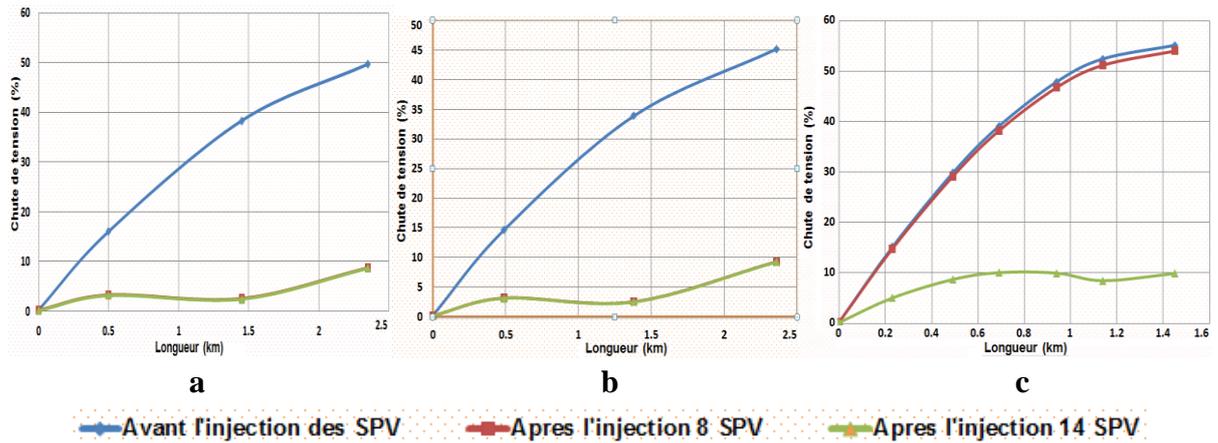
**Fig.3.16.a** Tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur A.

**Fig.3.16.b** Tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur B.

**Fig.3. 16.c** Tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur C.

Les résultats montrent une amélioration remarquable de la tension au long des réseaux BT après chaque connexion de SPV. Pour savoir si la chute de tension est devenue acceptable, on va

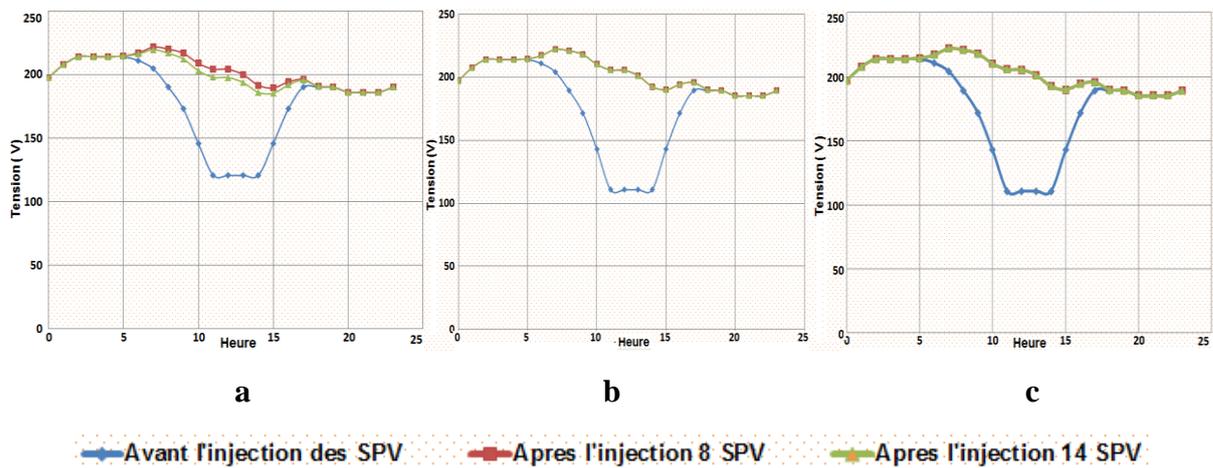
utiliser les résultats de simulation pour calculer la chute de tension; les résultats seront présentés de la même manière dans les figures 3. 17 (a, b, et c).



**Fig. 3.17.a** Chute de tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur A  
**Fig. 3.17.b** Chute de tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur B.  
**Fig. 3.17.c** Chute de tension au long du réseau électrique BT connecté au transformateur C.

Nous avons enregistré des améliorations de chute de tension au long des réseaux BT au fur et à mesure d’installer les SPV. Ainsi, la chute de tension est devenue acceptable après l’installation d’un SPV au niveau de chaque réseau. En effet, la chute de tension est autour de 10%, valeur fixée par le fournisseur d’électricité pour le réseau BT rural.

Pour connaître l’impact de cette connexion sur la tension des réseau BT durant la période de pointe de consommation; on va s’orienter maintenant à déterminer l’impact d’insertion des SPV sur la tension horaire au bout des trois réseaux présentés précédemment, les figures 3.18 (a, b, et c) présente la tension horaires avant l’installation des SPV, après l’installation de 8 puis 14 SPV, concernant les réseau A, B, et C.



**Fig. 3.18.a** Tension horaire au bout du réseau électrique BT connecté au transformateur A.

**Fig. 3.18.b** Tension horaire au bout du réseau électrique BT connecté au transformateur B.

**Fig. 3.18.c** Tension horaire au bout du réseau électrique BT connecté au transformateur C.

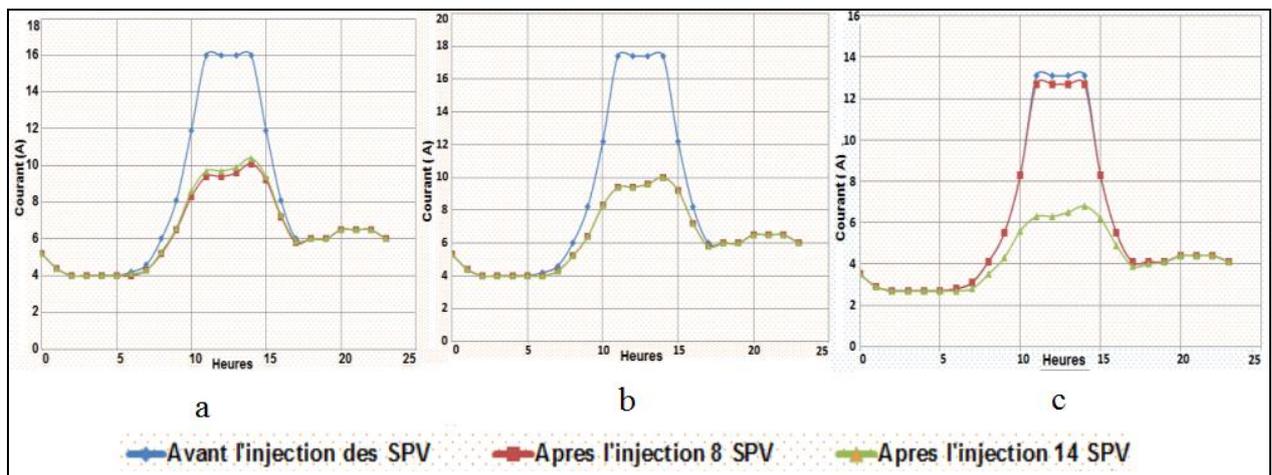
Les graphes montrent clairement l'amélioration de la tension horaire au bout des trois réseaux BT après chaque 'installation de SPV, surtout pendant les heures de pointe, cela s'expliquerait par le fait que le pic de consommation est en phase avec la période du fort 'ensoleillement sur le site, nous aurons donc un pic de production d'électricité PV. Ce phénomène est très intéressant pour éviter la provocation d'une surtension pendant le pic de production.

Donc après avoir équipé les réseaux BT avec des mini-centrales PV, on constate qu'il n'existe aucune chute de tension inacceptable (plus de 10%) surtout pendant les heures de pointes.

La solution proposée dans ce travail a permis de résoudre ce grand problème d'insuffisance d'énergie électrique, elle permet aussi aux habitants de se bénéficier d'énorme gisement solaire que caractérise leur site. Sachant que l'électricité produite par ces SPV est propre et gratuite.

### 3.10 Impact de la connexion des SPV sur le courant des réseaux BT

Après avoir déterminé la solution optimale parmi les deux propositions; on s'intéresse dans cette partie de notre travail par l'impact de la connexion des SPV sur le courant transité au bout de chaque réseau BT, pour cela nous avons simulé le profil horaire du courant transité par trois nœuds qui se trouvent au bout des trois réseaux BT définis précédemment. Les figures 3.19 (a, b, et c) nous présente les résultats de simulation avant la connexion des SPV, après la connexion de 8 SPV et dans le cas de sans chute de tension.



**Fig. 3.19.a** Courant horaire au bout du réseau BT connecté au transformateur A.

**Fig. 3.19.b** Courant horaire au bout du réseau BT connecté au transformateur B

**Fig. 3.19.c** Courant horaire au bout du réseau BT connecté au transformateur C.

Le profil horaire du courant transité avant la compensation photovoltaïque enregistre un pic entre 12<sup>h</sup> et 15<sup>h</sup>, à cause des chutes de tension importante enregistré durant cette période de pointe. Ce pic peut provoquer un endommagement du réseau, surtout qu'il est enregistré durant la période caniculaire de la journée.

Après l'installation des SPV, nous avons enregistré une baisse remarquable du courant transité au réseau pendant les mêmes horaires de pointe du 12<sup>h</sup> au 15<sup>h</sup> ; cette baisse est due à l'amélioration de la tension au bout des réseaux BT. Ainsi donc un générateur photovoltaïque réduit la chute de tension en réduisant le courant transité par la ligne.

### 3.11 Conclusion

On a vu dans ce chapitre l'importance d'utiliser les systèmes de production d'énergie dispersé pour résoudre les problèmes de transport de l'énergie électrique; le résultat obtenu était qu'il faut mieux utiliser des mini-centrales connecté au réseau BT pour la correction de la chute de tension.

L'énergie électrique photovoltaïque est produite pendant la forte demande en énergie qui coïncide avec le fort ensoleillement surtout en période d'Eté pour ces régions.

La connexion des systèmes photovoltaïques a permis d'améliorer la qualité électrique de la ligne grâce à l'injection dans le réseau de l'énergie électrique photovoltaïque propre. Ainsi ces centrales photovoltaïques contribuent à la réduction des besoins d'acheter de l'électricité.

### CONCLUSION GENERALE

Les travaux présentés dans cette thèse concernent les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique, ces systèmes sont amenés à connaître des développements importants liés essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification des moyens de production d'énergie et d'un meilleur respect de l'environnement. Cette technologie peut contribuer à une meilleure gestion de l'énergie électrique dans un contexte de développement durable.

L'intérêt porté aux énergies renouvelables nous a amené à nous intéresser au système photovoltaïque comme production décentralisée. Ainsi donc, le générateur photovoltaïque fournit une partie importante de l'électricité propre et sans émission de gaz polluants aux abonnés en réduisant à la fois leurs besoins d'acheter l'électricité et de la même occasion de résoudre le problème de la charge durant les périodes de pointe.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'apport de l'insertion des systèmes de production d'électricité photovoltaïques couplés au réseau MT et BT, sur l'amélioration de la tension par un dimensionnement adéquat de ces systèmes photovoltaïques. En effet, en bout de ligne électrique, des chutes de tension peuvent survenir et occasionner des désagréments pour la clientèle.

Ainsi, après un rappel général sur le rayonnement solaire et sur la présentation des systèmes photovoltaïques connectés aux réseaux électriques, en décrivant leurs principes de fonctionnement et les différentes configurations rencontrées, nous nous sommes intéressés à la modélisation du composant du système photovoltaïque connectés à un réseau BT. La modélisation, nous a permis de présenter les caractéristiques et le comportement de chaque élément du système photovoltaïque raccordé au réseau électrique.

Notre travail s'est basé sur l'étude d'un cas réel de problème de chute de tension, il s'agit d'un long réseau rural MT connecté à plusieurs branches BT, qui alimente une vaste zone rurale située dans un village à la wilaya de Chlef. Cet endroit souffre de problème de chute de tension surtout dans les heures de pointes. On a proposé deux méthodes : la première était de connecter des centrales PV au réseau MT, la seconde était de connecter des mini-centrales aux réseaux BT. Ensuite on a procédé à une comparaison des résultats des deux méthodes dont le but est de trouver la meilleure solution pour résoudre le problème étudié. La solution proposée a permis l'exploitation de l'énorme gisement solaire présent dans cette zone, et de produire une énergie propre et gratuite. L'énergie électrique photovoltaïque est produite à l'endroit du déficit et

## Conclusion générale

---

durant la période de forte demande en énergie qui coïncide avec le fort ensoleillement surtout en période d'été.

Les résultats obtenus, nous ont montré que l'utilisation des centrales PV connectés au réseau MT ne peut pas corriger la chute de tension au niveau des réseaux BT. Tandis que l'injection des mini-centrales aux réseaux BT a pu régler le problème traité. Ces résultats ont montré qu'à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque injectée dans le réseau BT, nous pouvons produire une partie importante de l'énergie électrique non polluante. Cette source d'énergie permet à l'abonné de redresser la tension pendant les périodes de forte demande, l'après midi de la saison d'été, et de la même occasion de réduire l'achat de l'électricité du réseau électrique.

Le travail effectué dans le cadre de ce thème, nous a conduit à aborder un sujet d'actualité et à assimiler une conséquente masse de données et de connaissances sur ce thème. Ce travail, nous a permis de mettre plusieurs pas dans le monde de la recherche.

### Bibliographie

- [1] Om Prakash Mahela, Abdul Gafoor Shaik, "*Comprehensive overview of grid interfaced solar photovoltaic systems*", Renewable and Sustainable Energy Reviews 68 (2017) 316–332
- [2] Yu. G. Kolomiets, Ya. A. Menshikov, and A. B. Tarasenko, "*Influence of Insulation Level on Electric Power Quality and Transformation Efficiency of Grid-Connected Photovoltaic Power Plants*", Applied solar energy, Vol. 54 No. 4 2018
- [3] H. Mekki , A. Mellit, H. Salhi, "*Artificial neural network-based modelling and fault detection of partial shaded photovoltaic modules*", Simulation Modelling Practice and Theory 67 (2016) 1–13
- [4] Tamer Khatib , Kamaruzzaman Sopian, Hussein A. Kazem, "*Actual performance and characteristic of a grid connected photovoltaic, power system in the tropics: A short term evaluation*", Energy Conversion and Management 71 (2013), 115–119
- [5] Fatemeh Najibi, Taher Niknam, "*Stochastic scheduling of renewable micro-grids considering photovoltaic source uncertainties*", Energy Conversion and Management, 98 (2015), 484–499
- [6] Anne labouret « *Energie solaire* », 2001
- [7] Y.Riffonneau, S.Bacha et Barruel « *Problématique du stockage associé aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau* », Revue des énergies renouvelables Vol 11 N° 3 (2008), Laboratoire des systèmes solaires /institut national d'énergie solaire (CEA/INES)
- [8] Alain Ricaud « *Modules et systèmes photovoltaïques* », Sep 2008.
- [9] Silvain Brigand « *Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque* », Avril 2008
- [10] Naim Houcine, "Etude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesure, controles et régulation de l'énergie électrique", thèse de doctorat, USTOran, Faculté de physique, 2015/2016.
- [11] Daha Hassan Daher, "*Modélisation et analyse expérimentale d'une centrale solaire PV en milieu désertique maritime*", thèse de doctorat, le 06/11/2017, institut national des sciences appliquées de Lyon
- [12] Bellala Djamel « *Contribution à l'optimisation des systèmes de conversion d'énergie application aux systèmes photovoltaïques.* », thèse de doctorat, Université de Batna (2008).
- [13] Akassewa Tchapo Singo « *Système d'alimentation PV avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome.* », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy I, Le 03/02/2010
- [14] Thi Minh Chau, "*Le Couplage onduleuse photovoltaïque et réseau aspect controle/commande et rejet de perturbations*", 2012
- [15] Olivier Ricardo, "*Réglage coordonné de tension dans les réseaux de distribution à l'aide de la production décentralisées*". Thèse de doctorat, Institut national polytechniques de Grenoble INPG, 2006.

- [16] Yaiche, M. R., et al., "Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration", *Energy Conversion and Management*, V. 82,(2014), 114-123.
- [17] Yaiche, M.R and Bouhanik, A., "Atlas solaire algérien", CDER, (2013).
- [18] Boukelia, T. E. and Mecibah, M.-S., "Parabolic trough solar thermal power plant: Potential, and projects development in Algeria", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 21,(2013), 288- 297.
- [19] Tuan Trank Quoc, "*Modélisation et amélioration des performances des réseaux électriques*". Thèse de doctorat, Institut national polytechniques de Grenoble INPG, 2000.
- [20] Yujun HE, "*Contribution au réglage de la tension sur un réseau HTA avec producteurs. Apport de la flexibilité de la demande*", thèse de doctorat, 2015, Centrale Suplec, numéro d'ordre: 2015- 05- TH.
- [21] «*Etude des réseaux basse tension*», Sonelgaz distribution centre, Direction technique électricité, Département conception normalisation et développement réseaux, Décembre 2009
- [22] Yann Pankow, «*Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque.*», Thèse de doctorat. Ecole normale supérieure d'arts et métiers, Centre nationale de recherche technologique de lille, Le 10/12/2004
- [23] «*Arrêté du 23 avril 2008 relatif aux prescriptions techniques de conception et de fonctionnement pour le raccordement à un réseau public de distribution d'électricité en basse tension ou en moyenne tension d'une installation de production d'énergie électrique* », Journal Officiel de la République Française, Avril 2008.
- [24] Trank Khanh Dung, "*Interconnexion des sources d'énergies renouvelables au réseau de distribution électrique*", 2009, Thèse de doctorat, université de Quebec à trois rivières
- [25] Thi Thu Hà PHAM, "*Influence de la production décentralisée sur la gestion des infrastructures critiques des réseaux de puissance*", *Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble. 2006.*
- [26] H.Colin (CEA-INES), C.Duvan Chelle (EDF), G.Moine (Transenergie), Y.Tanguy (Transenergie ), B. Gaidon (Hespul), T.Tran-Quoc (IDEA), «*Raccordement des installations PV au réseau publique de distribution électrique basse tension Cadre réglementaire, Impacts et préconisations.*», Avril 2010
- [27] Benchrif M, "*modélisation des systèmes énergétiques photovoltaïques et éolien-intégration dans un système hybride basse tension. Université Abou-Baker Belkaid Tlemcen*".
- [28] SONEGGAZ, Société Nationale de l'Electricité et de Gaz. Rapports d'activités et comptes de gestion consolidés 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013 and 2014. (<http://www.sonelgaz.dz>) [Accès 2015].
- [29] Manuel utilisateur JPélec v3. Supélec, 21 janvier 2010.