

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

و البحث العلمي وزارة التعليم العالي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli

Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي

معسكر

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Electrotechnique

Laboratoire des sciences et Techniques de l'Eau (LSTE)

## THESE de DOCTORAT

Spécialité : Réseaux de télécommunications

Intitulée

**Modélisation et simulation de la chaîne d'alimentation  
d'une station-relais de télécommunication (BTS) en  
énergie solaire en zone isolée du réseau électrique**

Présentée par : SI YOUCEF Hamza

Le...../...../20.....

Devant le jury :

Président	CHERGUM IDriss	MCA.	Université de Mascara
Examineur	SALMI Mohamed	Prof.	Université de Msila
Examineur	ELKEBIR Abdelkader	Prof.	Université de Mascara
Examineur	BOUANANE Abdelkrim	MCA	Université de Saida
Invité	LARBAOUI AHMED	MCA	Université de Mascara
Directeur de thèse	AFIF Benameur	MCA	Université de Mascara
Co-Directeur de thèse	BENHAMMOU Amina	MCA	Université de Boumerdès

Année Universitaire : 2021-2022

**ملخص:** يمثل الإمداد الصحيح بالطاقة لمحطات ترحيل الاتصالات ، خاصة في المناطق التي لا توجد بها كهرباء ، مشكلة للمشغلين الذين يتوقون إلى توسيع قاعدة عملائهم. إن اختيار هذا الموضوع من أجل مساعدة مشغلي الاتصالات الذين يستخدمون الطاقة الكهربائية أو الشمسية لتزويد محطات الترحيل الخاصة بهم على عدم "تكبد تكاليف إضافية" وبالتالي تحقيق وفورات كبيرة. وهكذا يتم تصميم لوحة تحكم بين المولد الكهروضوئي ومحطة اتصالات متنقلة (BTS) باستخدام مصدر طاقة متجددة. سيعمل هذا النظام باستخدام المطبر ، أي منظم الجهد ، وسيتم التحكم فيه بواسطة أمر MPPT (أقصى طاقة باللغة الإنجليزية ، تتبع النقاط). النمذجة والتحفيز سيوفران الطاقة المطلوبة. يمكن تقليل هدر الطاقة عن طريق تقليل عدد الألواح الشمسية. وبطاقة وحدة التحكم هذه ، لا يتم تزويد النظام بطاقة أقل أو أكثر ، ولكن بالحد الأدنى.

**Abstract:** The correct supply of power to telecom relay stations, especially in areas without electricity, is a headache for operators eager to expand their customer base. The choice of this subject for the sake of helping telecommunications operators who use either electric or solar energy to supply their relay stations not to 'incur additional costs' and thus to make significant savings. Thus the design of a controller board between the photovoltaic generator and a mobile telecommunications station (BTS) using a renewable energy source. This system will operate using a chopper, that is to say a voltage regulator, and will be controlled by an MPPT command (Maximum power, point tracking). modeling and simulation will provide the desired energy savings. Energy waste can be reduced by reducing the number of solar panels. And with this controller card, the system is not supplied with neither less nor more energy, but at the bare minimum.

**Résumé:** L'alimentation correcte en énergie des stations-relais de télécommunications, surtout dans les zones dépourvues de courant électrique, est un casse-tête pour les opérateurs avides d'élargir leur clientèle. Le choix de ce sujet par un souci d'aider les opérateurs de télécommunications qui ont recours soit à l'énergie électrique ou solaire pour l'alimentation de leurs stations-relais à ne pas 'supporter des surcoûts' et à faire ainsi des économies importantes. Ainsi la conception d'une carte de contrôleur entre le générateur photovoltaïque et une station de télécommunication mobile (BTS) en utilisant une source d'énergie renouvelable. Ce système fonctionnera grâce à un hacheur, c'est-à-dire un éleveur de tension, et sera piloté par une commande MPPT (en anglais maximum power, point tracking). la modélisation et la stimulation permettront de faire les économies d'énergie souhaitées. On pourra réduire le gaspillage d'énergie en réduisant le nombre de panneaux solaires. Et avec cette carte contrôleur, le système n'est pas alimenté ni en moins ni en plus d'énergie mais au strict minimum.

# Dédicaces

À Mes Parents,  
À toute ma famille  
À tous ceux que j'aime  
Je dédie ce modeste travail

# **Remerciements**

Tout d'abord, Je remercie mon Allah le tout puissant de m'avoir aidé, et de m'avoir donné le courage et l'honneur d'être Docteur en Réseaux et Télécommunications. J'espère bien être à la hauteur de ce titre.

Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude au Docteur **AFIF Benameur** de m'avoir accueilli, encadré et soutenu tout au long de ces quatre années de thèse et pour ses précieux conseils et ses encouragements continuels. Je suis particulièrement reconnaissante à Lui de m'avoir laissé une grande liberté scientifique, ce qui m'a offert la possibilité d'explorer des pistes de recherche en complet accord avec mes centres d'intérêt.

Mes profonds remerciements vont également à mon honorable Co-encadrant Dr.**Amina Benhamou** pour son soutien, son encadrement ses conseils, son appuis scientifique, psychologique durant toute la période de préparation de la thèse. Je vous remercie d'être toujours présent dans chaque pas de recherche, en chaque difficulté et moment de bonheur scientifique. C'était un immense plaisir de parcourir ce chemin de science à vos côtés.

Je remercie également tous le président et les Membres du jury. Qu'ils veuillent trouver ici toute ma reconnaissance pour la peine qu'ils ont prise afin d'examiner et d'évaluer ce travail.

Je remercie tout le personnel des laboratoires LSTE de l'université de Mascara sans oublier tous les membres du département d'électrotechnique de l'université Mustapha Stambouli de Mascara.

Merci à tous les membres de ma famille, qui par leur support et encouragement, m'ont permis de m'investir entièrement dans mes études.

Je tiens à remercier particulièrement mon amie Dr.**Ahmed Larbaoui** qui m'a beaucoup soutenu avant et pendant cette expérience de recherche.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, directement ou indirectement ont contribué à la réalisation de cette thèse.

Merci pour tous vos encouragements

# Table des Matières

Résumé .....	II
Dédicaces .....	IV
Remerciments .....	V
Table des Matières .....	VI
Liste des figures .....	XI
Liste des tableaux .....	XVI
Nomenclature .....	XVII

<b>Introduction générale.....</b>	<b>03</b>
-----------------------------------	-----------

---

## **Chapitre I: Energies renouvelables :Etat de l'Art**

---

I.1. Introduction .....	08
I.2. Sources renouvelables photovoltaïques (PV) .....	11
I.3. Sources renouvelables éoliennes (Wind) .....	12
I.4. Sources renouvelables Hybrides .....	14
I.5. References.....	17

---

## **Chapitre II:Chaines d'Alimentation des Stations de Télécoms en Energie Electrique**

---

II.1. Introduction .....	22
II.2. Technologie et consommation d'énergie .....	23
II.3. Alimentation du réseau .....	24
II.4. Alimentation en batteries.....	24
II.5. Alimentation électrique des générateurs Diesel .....	24

II.6. Partade de sites .....	25
II.7. Micro-réseau DC basé sur l'énergie éolienne et photovoltaïque .....	25
II.8 Modélisation du PV .....	26
II.9 Modèle de système de conversion de l'énergie éolienne .....	27
II.10 Risques liés au développement durable dans la chaîne d'approvisionnement des entreprises de télécoms.....	27
II.11. Analyse du cycle de vie des BTS sans fil: Avantages et inconvénients.....	30
II.12. Evolution de la chaîne de valeur et de la structure du marché du sans fil mobile ...	30
II.13. Éléments du coût total .....	32
II.14. Coût total de la chaîne d'alimentation.....	32
II.15. Commutateurs WAN .....	33
II.16. Impacts indirects de la consommation d'énergie des équipements de télécoms .....	34
II.17. Références .....	35

---

## **Chapitre III:Outils de Modélisation et Simulation des Chaînes Alimentant les Stations BTS**

---

III.1. Introduction .....	38
III.2. Logiciel HOMER .....	39
III.3. Modèles Mathématiques des Composants de Systems dans HOMER .....	40
III.4. Exemple de simulation de l'alimentation d'une BTS par HOMER.....	41
III.4.1. Modélisation du système proposé .....	41
III.4.2. Cellule solaire photovoltaïque.....	42
III.4.3. Batterie .....	42
III.4.4. Convertisseur.....	43
III.4.5. Générateur Diesel (DG) .....	43
III.4.6. Réseau électrique.....	43
III.4.7. Résultats de simulation avec HOMER dans une zone éloignée choisie .....	43

III.5. Logiciel PVSyst.....	46
III.6. Flexibilité de la modélisation de PVSystem .....	48
III.7. Capacité de modélisation économique et de performance de PVSyst .....	48
III.8. Premier contact avec PVsyst .....	49
III.9. Étapes du développement d'un projet.....	50
III.10. Références .....	51

---

## **Chapitre IV :Evaluation de Production d'Energie des Systèmes Injectés aux Réseaux Electriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Energie des BTS**

---

IV.1. Introduction .....	53
IV.2. Consommation d'énergie dans les couches des réseaux télécoms .....	53
IV.3. Efficacité énergétique dans les réseaux de télécommunications .....	54
IV.4. Comptabilité des BTS .....	55
IV.5. Consommation électrique due à la BTS.....	57
IV.6. Alimentation DC .....	58
IV.7. Consommation d'énergie dans une station de télécoms .....	58
IV.7.1. Système de refroidissement.....	58
IV.7.2. Climatisation .....	59
IV.7.3. Echangeur de chaleur ou système de refroidissement libre .....	59
IV.7.4. Technologie de refroidissement par ventilation .....	60
IV.7.5. Consommation d'énergie due à l'unité radio .....	60
IV.7.6. Consommation d'énergie due aux pertes de chemin de propagation.....	60
IV.8. Systèmes hybrides.....	60
IV.9. Modélisation du système hybride.....	61
IV.10. Charge BTS.....	62



IV.11. Efficacité énergétique d'un système de tracking par Internet.....	62
IV. 12. Performance du système de production d'énergie photovoltaïque pour BTS .....	64
IV. 13. Conclusion .....	68
IV.14. References .....	68

---

## **Chapitre V: Résultats et Discussions**

---

V.1 Partie A: Coûts compétitifs des systèmes photovoltaïques pour BTS en zones éloignées.....	72
V.1.1. Alimentation des BTS en réseaux de télécoms.....	72
V.1.2. Présentation du logiciel PVSYSYSTEM.....	74
V.1.3. Evaluation et analyse .....	74
V.1.4. Analyse des résultats de PVSyst.....	75
V.1.5. Dimensionnement du système PV alimenté par le réseau .....	75
V.1.6. Production/valorisation du système lors de l'injection dans le réseau .....	77
V.1.7. Productions normalisées .....	78
V.1.8. Evaluation économique .....	78
V.2. Partie B: Analyse des performances et optimisation technico-économique des systèmes d'énergie verte pour les zones isolées .....	81
V.2.1 Modélisation du système PV et MPPT.....	85
V.2.2. Evaluation Techno-économique .....	90
V.3. Conclusion.....	96
V.4. References .....	96
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>104</b>
<b>Annexe (Publications Internationales) .....</b>	<b>106</b>

## Listes des figures

**Figure I.1:** Présent et futur des énergies renouvelables pour les télécoms.

**Figure I.2:** Systèmes énergétiques modernes, intégrant des sources d'énergie renouvelables.

**Figure I.3:** Infographie sur la production d'énergie renouvelable avec des symboles de production d'électricité écologique. Sources d'électricité écologiques dans des symboles de style plat [11].

**Figure I.4:** Énergies renouvelables en Allemagne [12].

**Figure I.5 :** Panneaux photovoltaïques ultra-minces et flexibles [15, 16].

**Figure I.6 :** Déploiement de l'énergie éolienne jusqu'en 2050 dans la feuille de route [21].

**Figure I.7 :** Coût de la production d'électricité éolienne par rapport aux autres sources d'énergie 2009-2018 [22].

**Figure I.8 :** PV orienté verticalement [35].

**Figure. II.1 :** Installation d'une BTS alimentée en hybride (PV et Oléen) [2]

**Figure II.2.** Équipement de redressement sur le site de la BTS [1].

**Figure II.3.** Unité de distribution d'énergie (PDU) typique [1].

**Figure. II.4.** Tour montrant le partage

**Figure. II.5.** Architecture du système de micro-réseau DC basé sur les énergies renouvelables pour l'alimentation d'une tour de télécommunication [7].

**Figure.II.6.** Consommation d'énergie par les réseaux mobiles [10].

**Figure.II.7.** Risques liés à la durabilité de la chaîne d'alimentation et chevauchement entre la gestion durable, la gestion de la chaîne d'alimentation et la gestion des risques et les chevauchements entre la gestion durable, la chaîne d'alimentation et la gestion des risques [10]

**Figure. II.8.** Facteurs contribuant à l'énergie durable [10].

**Figure. II.9.** Chaîne de valeur du sans fil mobile. [12].

**Figure. II.10.** Dynamique concurrentielle dans la chaîne de valeur du sans-fil mobile [12].

**Figure. II.11.** Consommation annuelle d'électricité d'un équipement de réseau (TW-h).

**Figure. III.1.** Station BTS en télécom, alimentée par un HRES

**Figure.III.2 :** Système solaire PV-batterie pour une BTS connecté au réseau.

**Figure. III.3.** Valeurs optimisées pour les composants.

**Figure. III.4.** Production d'électricité (système traditionnel).

**Figure. III.5.** Production d'électricité (système proposé).

**Figure. III.7.** Origine de développement de PVSyst

**Figure. III.8.** Page principale lors du premier contact avec PVsyst [10].

**Figure. III.9.** Conception préliminaire sur PVSyst [10].

**Fig. III.10.** Tableau de bord pour gérer un projet dans PVSyst [**Ref. 10**].

**Figure.IV.1.** Consommation d'énergie dans les différentes couches du réseau [4].

**Figure. IV.2.**Diagramme schématique l'alimentation d'une BTS sur le site de télécommunication par PV et Pile à combustible assistée [9].

**Figure. IV.3.a)** Schéma fonctionnel d'une BTS [11]; **b)** Structure d'une station de base cellulaire typique [4].

**Figure. IV.4.** Organigramme du système hybride optimisé par HOMER [17].

**Figure. IV.5.**Stations BTS dans un réseau d'accès radio propre 'Clean-Radio Access'

**Figure. IV.6.a)** Performance des modules PV à différents niveaux d'irradiation et températures, **b)** Irradiations liées aux puissances moyennes [22].

**Figure. IV.7.**Variations de l'irradiance du soleil sur de courtes échelles de temps [22].

**Figure.V.1.** Emplacements des sites de Tamanrasset et de Tunis.

**Figure.V.2.**Rayonnement solaire global annuel dans les deux zones.

**Figure. V.3.** Dimensionnement des systèmes PV connectés au réseau pour les deux sites.

**Figure.V. 4.** Productions d'énergie normalisées par kWp installé, dans : a) Tamanrasset, b) Tunis

**Figure.V. 5.** Évaluation économique (rapport financier) du système dans : a) Tamanrasset, b) Tunis.

**Figure.V.6.** Cherb Errih (zone éloignée en milieu de la carte): Situation géographique et climat global (35°28'26 "N, 0°09'40 "E), Vitesse moyenne du vent de 8,4 à 9,5 mph ; c) 9,6 à

8,3 mph, tous vents en mars et de mi-novembre à mi-décembre. Fourchettes de températures de bas en haut en juillet : (19-36)°C [31],[32].

**Figure.V.7.**Circuit équivalent d'une cellule PV à une diode [49] (a) et schéma du système PV (b) par Simulink.

**Figure.V. 8.** Caractéristiques P-V des modules PV sous : a) différents rayonnements et température constante (25 °C), b) températures et rayonnement constant (1000W/m<sup>2</sup>).

**Figure. V.9.** Caractéristiques I-V (panneau supérieur) et P-V (panneau inférieur) du module PV sous différents rayonnements et à température constante (25 °C).

**Figure. V.10.** Caractéristiques I-V (gauche) et P-V (droite) du module PV dans différentes conditions de température et de rayonnement constant ( $G = 1000\text{W/m}^2$ ).

**Figure .V. 11.** Formes d'onde de la tension et du courant du module PV.

**Figure. V.12.** a) Configuration générale, et b) Profil BTS quotidien (charge) du HGES PV/éolienne.

**Figure.V.13.** Rayonnement solaire quotidien avec l'indice de clarté

**FigureV. 14.** production électrique moyenne mens mensuelle de al région éloignée.

**Figure. V.15.** Résumé des coûts des HGES éolien/PV à la zone éloignée.

**Figure. V. 16.** Production annuelle d'énergie photovoltaïque et éolienne pour la région éloignée choisie.

## Liste des tableaux

**Tableau III.1.** Informations sur les éléments.

**Tableau III.2.** Comparaison des coûts entre les deux systèmes: (a) Traditionnel (b) Proposé.

**Tableau III.3.** Comparaison des données d'émission entre les deux systèmes: (a) Traditionnel (b) Proposé.

**Tableau IV.1 :** exemple de consommation électrique pour la zone des sites BTS 6/6/6 et 2/2/2

**Tableau. IV.2.** Principaux paramètres du module PV modélisé [22].

**Tableau V.1.** Résumé des résultats mensuels et annuels (Bilans et principaux résultats des systèmes PV Si-poly de 39,6 kWc) obtenus pour les deux sites : Tamanrasset (en bleu) et Tunis (en rouge).

**Table. V.2**Caractéristiques du module SW250 Mono de Solar World.

**Tableau V. 3.** Paramètres de coût des composants

# Nomenclature

<i>EArray</i>	<i>Effective energy at the output of the array (in kWh)</i>
<i>E_Grid</i>	<i>Energy injected into grid (in kWh)</i>
<i>CUF</i>	<i>Capacity utilization factor (in %)</i>
<i>EffArrR</i>	<i>Efficiency of the array (Effic.Eoutarray / rough area) (in %)</i>
<i>EffSysR</i>	<i>Efficiency of the system (Effic.Eoutsystem / rough area) (in %)</i>
<i>GlobInc</i>	<i>Global incident in collector plane (in kWh/m<sup>2</sup>)</i>
<i>GlobHor</i>	<i>Horizontal global irradiation (in kWh/m<sup>2</sup>)</i>
<i>GlobEff</i>	<i>Effective global, correction for IAM shadings (in kWh/m<sup>2</sup>)</i>
<i>LC</i>	<i>Capture losses (in kWh/kWp/day)</i>
<i>LS</i>	<i>System losses (in kWh/kWp/day)</i>
<i>PV</i>	<i>Photovoltaic(s)</i>
<i>Si-Poly</i>	<i>Silicon poly-crystalline</i>
<i>TAmb</i>	<i>Ambient temperature (in °C)</i>
<i>Yf</i>	<i>Produced useful energy (inverter output in kWh/kWp/day)</i>
<i>TNs</i>	<i>Telecom Networks</i>
<i>AC</i>	<i>Alternating Current</i>
<i>BTS</i>	<i>Base Transceiver Station</i>
<i>CI</i>	<i>Clearness Index</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current</i>
<i>DG</i>	<i>Diesel Generator</i>
<i>HGES</i>	<i>Hybrid Green Energy System</i>
<i>LCC</i>	<i>Life-cycle cost</i>
<i>MatLab</i>	<i>Matrix Laboratory</i>
<i>LTE</i>	<i>Long-Term Evolution</i>
<i>O&amp;M</i>	<i>Operation and Maintenance</i>
<i>QoS</i>	<i>Quality of Service</i>
<i>G/RER</i>	<i>Green/Renewable Energy Resources</i>
<i>SI</i>	<i>Solar Irradiance</i>
<i>STC</i>	<i>Standard Test Conditions</i>
<i>WE</i>	<i>Wind Energy</i>
<i>BST</i>	<i>Battery Storage Systems</i>
<i>COE</i>	<i>Cost Of Energy</i>
<i>HOMER</i>	<i>Hybrid Optimization Of Multiple Energy Resources</i>
<i>LCOE</i>	<i>Levelized Cost Of Energy</i>
<i>NPC</i>	<i>Net Present Cost</i>



# *Introduction Générale*



## **Introduction générale**

Les télécommunications ont rencontrés assez de difficultés face à l'augmentation constante de la demande des utilisateurs en termes de services (voix, données, vidéoconférence, chat et médias sociaux), ce qui exerce une pression sur les entreprises de télécoms pour qu'elles fournissent davantage d'infrastructures, surtout dans les zones rurales et les régions éloignées [1]. La non électrification de ces régions, ou les coupures de courant et l'insuffisance des infrastructures du réseau électrique sont parmi les obstacles majeurs auxquels les opérateurs de télécoms sont confrontés dans le déploiement de leurs réseaux. Dans un pays développé, de tels obstacles sont facilement surmontés grâce à l'infrastructure de réseau bien développée. Cependant, dans un pays en développement comme l'Algérie, où le raccordement au réseau est quasi-inexistant dans la majorité des zones rurales périphériques, il est difficile d'alimenter en électricité les stations BTS de l'évolution à long terme [2,3]. En fait, l'entreprise doit supporter le coût des infrastructures nécessaires pour connecter l'énergie des sources aux utilisateurs (divers en termes d'emplacement, de population clairsemée, de faibles revenus), d'où la nécessité de faire partie du monde global. Cela présente une complication, car la communication mobile s'étend de plus en plus dans les zones rurales où l'accès au réseau national est limité ou inexistant. L'électrification par l'extension du réseau ou par une centrale électrique secondaire ne peut couvrir qu'une petite partie des ménages dans les zones rurales périphériques. En outre, il n'est pas rentable d'étendre le réseau à ces endroits en raison de l'énorme distance qui les sépare des régions développées [3, 4].

L'utilisation et la mise en œuvre des ressources énergétiques renouvelables augmentent rapidement, ainsi le monde devient moins dépendant des combustibles fossiles pour réduire les effets des émissions de gaz à effet de serre sur l'environnement grâce à ces ressources. Et, en raison des effets accrus du réchauffement de la planète dus aux gaz à effet de serre, il est de plus en plus nécessaire d'utiliser des solutions énergétiques sans émissions [5,6].

La production d'énergie à partir de ressources énergétiques renouvelables, sauvegardant l'environnement et réduisant l'utilisation de combustibles et des coûts d'exploitation mineurs et la diminution de l'investissement initial en capital par rapport aux infrastructures de réseau conventionnelles, est très importante pour les opérateurs de télécoms et le déploiement des BTS dans les zones rurales éloignées. Déployer ces réseaux dans ces

zones est inévitable pour des raisons de facilité d'homogénéité des réseaux, de réglementation nationale des télécoms, de développement des zones rurales en tant que pôles économiques et d'amélioration des services dont ont besoin les utilisateurs de réseaux cellulaires [7,8].

Pour alimenter une BTS dans les zones éloignées, différentes sources d'énergie renouvelables sont à envisager pour obtenir un système fiable, abordable et efficace, pouvant répondre à la demande de charge des BTS. Concevoir un tel système, nécessitant peu de maintenance et s'adaptant à l'environnement, est cruciale pour alimenter une BTS dans les zones reculées [8,9]. Il n'y a pas d'énergie à fournir pendant la nuit pour alimenter la BTS en ces régions, puisque le PV dépend du soleil pour produire de l'électricité. Un système hybride contenant l'éolien et le photovoltaïque et une batterie de stockage est utilisé pour répondre à la demande de charge de la BTS, pour améliorer la fourniture d'énergie à la charge.

Pour plus de fiabilité, un système de stockage d'énergie est ajouté pour stocker l'énergie excédentaire générée par les sources d'énergie renouvelables, qui sera utilisée pour alimenter la charge lorsque ces sources ne seront pas en mesure de répondre à la demande: système dit hybride à sources d'énergie renouvelables (HRES: Hybrid Renewable Energy Sources), combinant les sources d'énergie et le stockage sur batterie sont préférés pour alimenter les BTS dans les zones rurales ou éloignées [10,11].

En raison de l'augmentation sans cesse du nombre d'abonnés aux télécoms, les opérateurs de télécoms sont désireux d'élargir leur infrastructure de réseau ainsi que le service à l'utilisateur final, ce qui montre qu'il est nécessaire d'envisager d'autres options énergétiques telles que les ressources d'énergie renouvelable pour alimenter les BTS. La raison du déploiement des HRES, comme principales sources d'énergie renouvelables pour le secteur des télécoms dans un pays en développement comme l'Algérie, est de réduire les effets environnementaux des sources d'énergie traditionnelles, telles que la production décentralisée qui est couramment utilisée comme système de secours pour les BTS situées à distance.

Instaurer un système HRES contribue à atténuer les polluants provenant d'une dépendance excessive à l'égard du réseau électrique et des générateurs diesel, d'où l'avantage d'incorporer un micro-réseau HRES réduirait les coûts élevés de maintenance et d'exploitation de ces générateurs. En outre, cela va améliorer la stabilité de l'alimentation électrique des sites BTS [12,13].

Par conséquent, le déploiement de ressources énergétiques durables, par exemple l'énergie photovoltaïque et éolienne, contribuera à prévenir ces problèmes, et le déploiement de

l'énergie photovoltaïque et éolienne comme source d'énergie durable, dans ce cas particulier, contribuera à améliorer l'alimentation électrique du BTS: cela réduit les effets des émissions de gaz à effet de serre et du bruit sur l'environnement, et améliore la qualité du service [13]

Le but de cette étude est de concevoir de manière optimale un HRES qui a le potentiel de générer une puissance électrique pouvant alimenter adéquatement une BTS dans les zones rurales de l'Algérie. Cette thèse est organisée comme suit :

Au chapitre 1 est donné l'état de l'art des énergies renouvelables, et leurs applications aux réseaux de télécoms comme alternatives aux générateurs Diesel.

Le chapitre 2 focalise sur les chaînes d'alimentation des stations de télécoms (ici BTS) en énergie électrique.

Le chapitre 3 étudie les outils de Modélisation et Simulation des Chaînes Alimentant les Stations BTS, et les méthodes de modélisation réalisables pour les différents ressources d'énergies renouvelables utilisées dans le système HRES proposé, et celles de contrôle du HRES pour alimenter la charge de la BTS. Enfin, les méthodes d'optimisation sont examinées, en mettant l'accent sur le logiciel HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables), car il s'agit de l'outil d'optimisation privilégié, largement utilisé dans les industries pour toutes les simulations liées au HRES.

Le chapitre 4 est consacré à l'Evaluation de Production d'Energie des Systèmes Injectés aux Réseaux Electriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Energie

Le Chapitre 5 présente les résultats obtenus par la simulation, le dimensionnement et la simulation sont discutés. Toutes les configurations réalisables présentées par les résultats de la simulation sont comparées en fonction des objectifs et des contraintes stipulés, afin de déterminer quel est le système HRES le plus réalisable, le plus rentable, le plus fiable et le plus respectueux de l'environnement entre le système PV/éolien proposé et le système générateur d'électricité/stockage de batterie qui est actuellement utilisé pour alimenter les BTS dans les zones rurales/éloignées.

Enfin, Les résultats et les conclusions du chapitre 5 sont conclus et les principales prédictions du projet sont mises en évidence ainsi que les perspectives futures.

## References

- [1]. M. F. Mpwanya and C. H. V. Heerden, "Perceptions of mobile network operators regarding the cost drivers of the South African mobile phone industry," *Acta Commercii*, vol. 16, no. 1, Sep. 2016; S. Lehlo, Sempe Thom. "Optimisation of hybrid micro-grid system for LTE base station." PhD diss., 2020. <https://doi.org/10.51415/10321/3648>.
- [2]. P. Nduhuura, A. Zerga, and M. Garschagen, "Power Outages in Africa – An Assessment Based on Regional Power Pools," *SSRN Electronic Journal*, 2018.
- [3]. P. P. Kumar, G. S. Sarma, and R. P. Kumar, "Barriers for Implementation of Renewable Energy Technologies in Rural Areas-a Review," *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, vol. Volume-1, no. Issue-6, pp. 942–945, 2017.
- [4]. Y. Mekonnen and A. I. Sarwat, "Renewable energy supported microgrid in rural electrification of Sub-Saharan Africa," 2017 IEEE PES PowerAfrica, 2017.
- [5]. P. Moriarty and D. Honnery, "Global renewable energy resources and use in 2050," *Managing Global Warming*, pp. 221–235, 2019.
- [6]. C. Vogel and M. Swilling, "Climate change and vulnerability in South Africa," *Sustainability Transitions in South Africa*, pp. 40–57, Nov. 2018.
- [7]. B. Bossoufi, M. Lamnadi, M. Trihi, and A. Boulezhar, "Optimal design of stand-alone hybrid power system using wind and solar energy sources," *International Journal of Energy Technology and Policy*, vol. 15, no. 2/3, p. 280, 2019.
- [8]. A. Yahya, "Opportunities, Challenges, and Terms Related to LTE-A Cellular Network," *LTE-A Cellular Networks*, pp. 5–40, Mar. 2016.
- [9]. B. Shah, G. Dalwadi, H. Shah, and N. Kothari, "Energy-Efficient LTE Access Network For Rural And Remote Areas," *Far East Journal of Electronics and Communications*, vol. 18, no. 7, pp. 1073–1097, 2018.
- [10]. M. Alsharif and J. Kim, "Optimal Solar Power System for Remote Telecommunication Base Stations: A Case Study Based on the Characteristics of South Korea's Solar Radiation Exposure," *Sustainability*, vol. 8, no. 9, p. 942, 2016.
- [11]. J. F. G. D. Oliveira and T. C. G. Trindade, "Sustainability Performance Evaluation of Renewable Energy Technologies," *Sustainability Performance Evaluation of Renewable Energy Sources: The Case of Brazil*, pp. 77–88, 2018.

[12]. A. Aittokallio, "Mobile data traffic to increase ten-fold by 2019 – report," Telecoms.com, 04-Feb-2015. [Online]. Available: <http://telecoms.com/396142/mobile-data-traffic-to-increase-ten-fold-by-2019-report/>. [Accessed: 04-Aug-2019].

[13]. P. A. Owusu and S. Asumadu-Sarkodie, "A review of renewable energy sources, sustainability issues and climate change mitigation," *Cogent Engineering*, vol. 3, no. 1, 2016.

# *Chapitre I*

**Energies Renouvelables :Etat de l'Art**

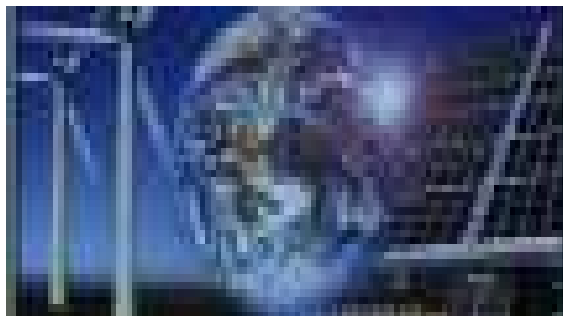
## I.1.Introduction

Dans le monde entier, la recherche, le développement et les principaux efforts de mise en œuvre se concentrent sur les énergies renouvelables. sont axés sur les énergies renouvelables. Historiquement, l'hydroélectricité a représenté une grande partie de la capacité de production d'énergie renouvelable installée. installée, qui dépasse aujourd'hui les 1 600 GW. Ces dernières années, d'autres sources, telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire (photovoltaïque à concentration et chaleur solaire), la géothermie, la bioénergie (gaz et paille/bois) et l'énergie des océans (marées et vagues), ont représenté ensemble une proportion substantielle de la nouvelle capacité installée. [1].

L'évolution technique rapide doit s'accompagner de normes pour garantir le plus haut niveau possible de qualité, de fiabilité et de durabilité des produits, ainsi que des conditions de marché transparentes. Cela nécessite des protocoles de mesure fiables, reproductibles et largement applicables pour l'évaluation de la performance électrique des dispositifs PV des technologies PV traditionnelles et émergentes [2].

L'essence de l'énergie pour notre société est en croissance pour assurer la qualité de vie et pour faire fonctionner sans heurts les autres éléments de notre économie. L'utilisation des ressources énergétiques a été considérée comme l'une des questions les plus importantes et les plus constantes des temps modernes. Les énergies renouvelables émergentes sont soit des formes spéciales ou avancées des sources d'énergie traditionnelles (solaire, éolienne, géothermique, biocarburants, biomasse et hydroélectricité), soit de toutes nouvelles technologies. hydroélectrique) ou de toutes nouvelles technologies[3].Cependant, il a été observé que les combustibles fossiles et le ciment augmentent leur part dans les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> et que les forêts établies diminuent leur rôle de puits de CO<sub>2</sub>[4].

L'augmentation du CO<sub>2</sub> entraîne une hausse significative du niveau moyen de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, qui était de 280 p/m à l'ère préindustrielle et a été porté à 390 p/m[5].

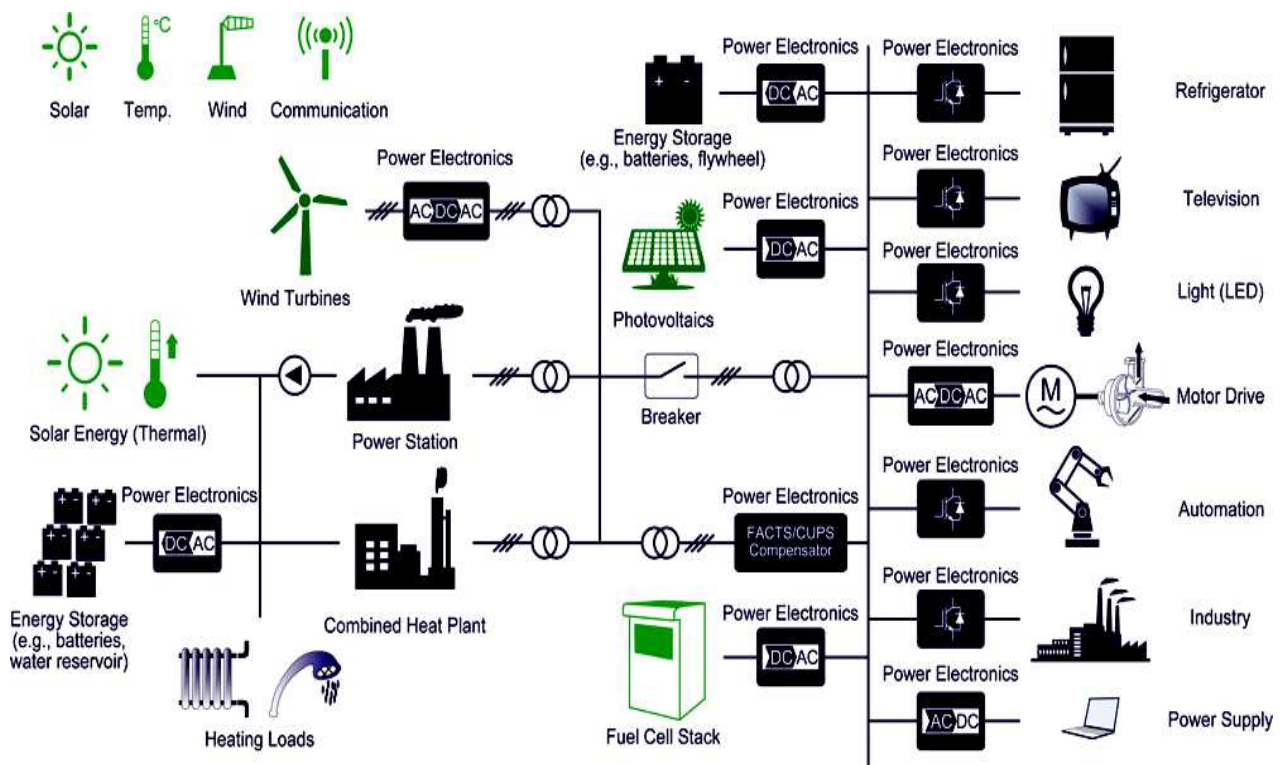


**Figure I.1:** Présent et futur des énergies renouvelables pour les télécoms.

Il ya trois grandes catégories de sources d'énergie: les combustibles fossiles, les ressources nucléaires et les sources d'énergie renouvelables; les dernières sont susceptibles de jouer un rôle important dans l'avenir du monde, et peuvent être utilisées pour produire de l'énergie à l'infini : énergie solaire, énergie éolienne, énergie géothermique, énergie marine, énergie de la biomasse, biocarburants, et bien d'autres encore [6].

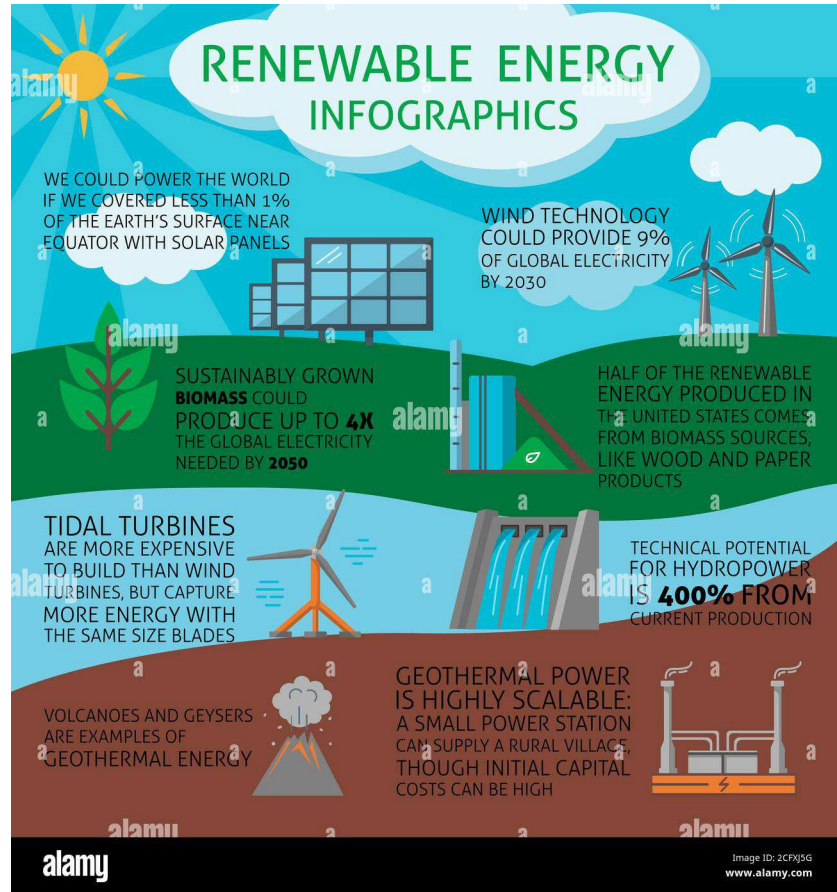
Les sources d'énergie renouvelables ont la capacité de fournir une énergie exempte de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en émettant zéro ou presque zéro pour cent de ces gaz [7].

Il s'agit d'un moyen fiable, abordable et écologiquement durable de récolter l'énergie renouvelable dans une zone géographique donnée. écologiquement durable de récolter l'énergie renouvelable de manière décentralisée pour répondre aux les besoins énergétiques des zones rurales et des petites exploitations [8,10].



**Figure I.2:** Systèmes énergétiques modernes, intégrant des sources d'énergie renouvelables, une production distribuée et des fonctions de réseau intelligent. L'intégration est rendue possible par l'utilisation intensive de l'électronique de puissance [8].





**Figure I.3:** Infographie sur la production d'énergie renouvelable avec des symboles de production d'électricité écologique. Sources d'électricité écologiques dans des symboles de style plat [11].



**Figure I.4:**Energies renouvelables en Allemagne [12].

## I.2. Sources renouvelables photovoltaïques (PV)

Pour les tours de télécoms et les systèmes de télécoms volants permettent l'utilisation la fibre optique, les panneaux photovoltaïques pour répondre aux besoins en énergie électrique du système de télécoms, la plupart du temps, installés verticalement. Lorsque ces tours sont construites dans un environnement urbain ou à proximité de la ville, le réseau électrique fournit de l'énergie aux appareils électroniques embarqués. En revanche, dans un région isolée, l'énergie est fournie par des micro-réseaux qui utilisent généralement des générateurs diesel. Les systèmes hybrides ont été développés ces dernières années et ont introduit des énergies renouvelables avec une préférence pour les panneaux photovoltaïques [13].

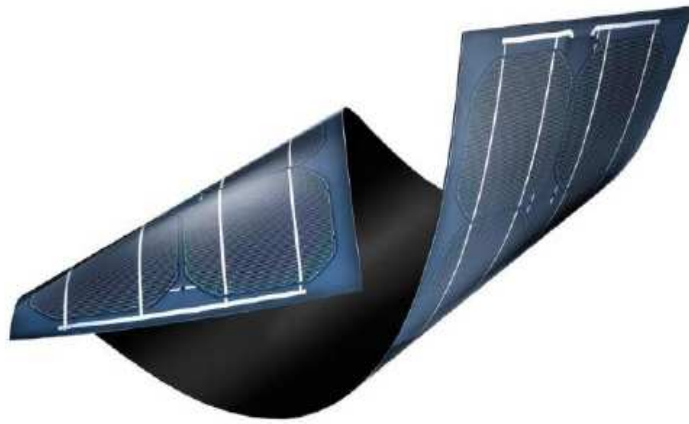
Ces solutions sont viables lorsque le potentiel d'ensoleillement du site d'installation le permet. Ces tours ou pylônes métalliques ont une hauteur qui peut varier entre 30 m et 150 m. Ils peuvent, dans certains cas, être tirés. Dans les zones urbaines, les bâtiments peuvent servir de tours de télécoms. Les systèmes de télécoms qui intéressent les opérateurs évoluent dans un environnement isolé, où l'absence de réseau électrique est l'une des caractéristiques de ce type d'environnement. Ces systèmes comprennent des structures actives pour fournir l'énergie nécessaire à la transmission, au relais ou à la réception des signaux.

Par conséquent, l'alimentation en énergie électrique est un paramètre important pour la caractérisation du système, a fortiori dans un environnement isolé, et l'utilisation des énergies renouvelables [14], photovoltaïques ou autres, sera une solution privilégiée dans le futur.

Cela limite l'accumulation de gel et empêche l'accumulation de neige. Cependant, cette solution n'est pas optimale car le panneau photovoltaïque n'est pas orienté en permanence face à l'extérieur et non orienté en permanence vers le soleil. D'autre part, les tours de télécoms sont une très bonne solution pour résister aux vents forts et aux températures trop basses. La fibre optique est encore plus intéressante, et est la meilleure solution puisqu'elle est enterrée et ne subit donc pas les inconvénients du vent. A chaque point de la fibre où se trouvent les terminaux d'accès ou simplement les répéteurs, les entités photovoltaïques pour les réseaux de distribution d'électricité, et n'ont pas de dimensions qui les mettent en danger en cas de vents forts.

Comme le montre la figure I. 4, des panneaux photovoltaïques flexibles permettront d'atteindre l'autonomie des ballons en énergie électrique. Grâce à leur faible épaisseur, ces

structures ont l'avantage d'être flexibles et légères. Cependant, elles doivent être construites sur le même substrat [15].



**Figure I.5 :** Panneaux photovoltaïques ultra-minces et flexibles [15, 16].

### I.3. Sources renouvelables éoliennes (Wind)

Les énergies renouvelables constituent aujourd'hui le premier choix à considérer comme énergie alternative lorsque les systèmes électriques doivent être modernisés et développés. 90% de ces énergies renouvelables sont sous forme d'énergie solaire et éolienne. Les investissements dans ces deux sources ont fortement augmenté et sont compétitives par rapport aux les sources d'électricité conventionnelles. Le coût des systèmes d'énergie éolienne n'a cessé d'augmenter. Cela s'est reflété dans le coût de l'électricité. Les conséquences du changement climatique ont imposé une forte pression sur les gouvernements pour qu'ils commencent à chercher des alternatives et des d'énergie durable pour réduire l'empreinte carbone et les émissions. En réponse, le nombre d'enchères organisées pour ces systèmes a considérablement augmenté. nombre d'enchères organisées pour ces systèmes, passant de 6 en 2005 à plus de 67 en 2017. Les installations d'énergie éolienne ont fortement augmenté ces dernières années. Le développement et les progrès des systèmes de production d'énergie systèmes de production d'énergie éolienne ont atteint des niveaux élevés et ont suscité intérêt dans le monde entier [17-20].

Le développement technologique des systèmes associés à l'énergie éolienne doit être durable afin de soutenir l'atténuation du climat l'atténuation du changement climatique, les avantages économiques et la sécurité énergétique. L'énergie éolienne a un potentiel technique mondial cinq fois supérieur à la production énergétique mondiale actuelle (c'est-à-dire

quarante fois plus que la production d'électricité: soit quarante fois la demande mondiale d'électricité dans le scénario le plus optimiste)[17-20].

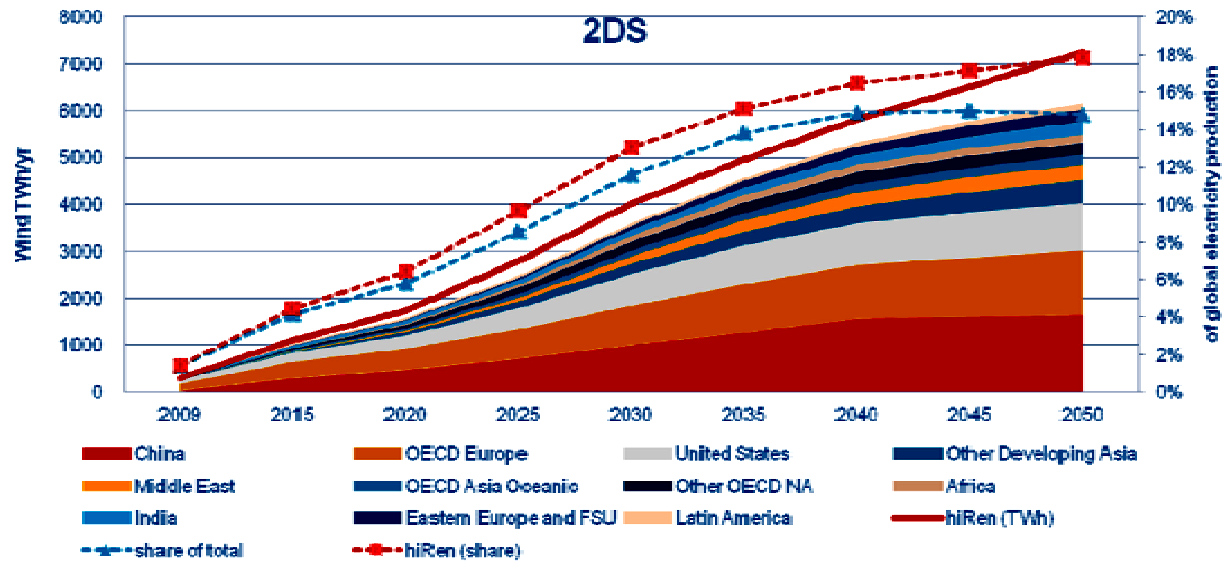


Figure I.6 :Déploiement de l'énergie éolienne jusqu'en 2050 dans la feuille de route [21].

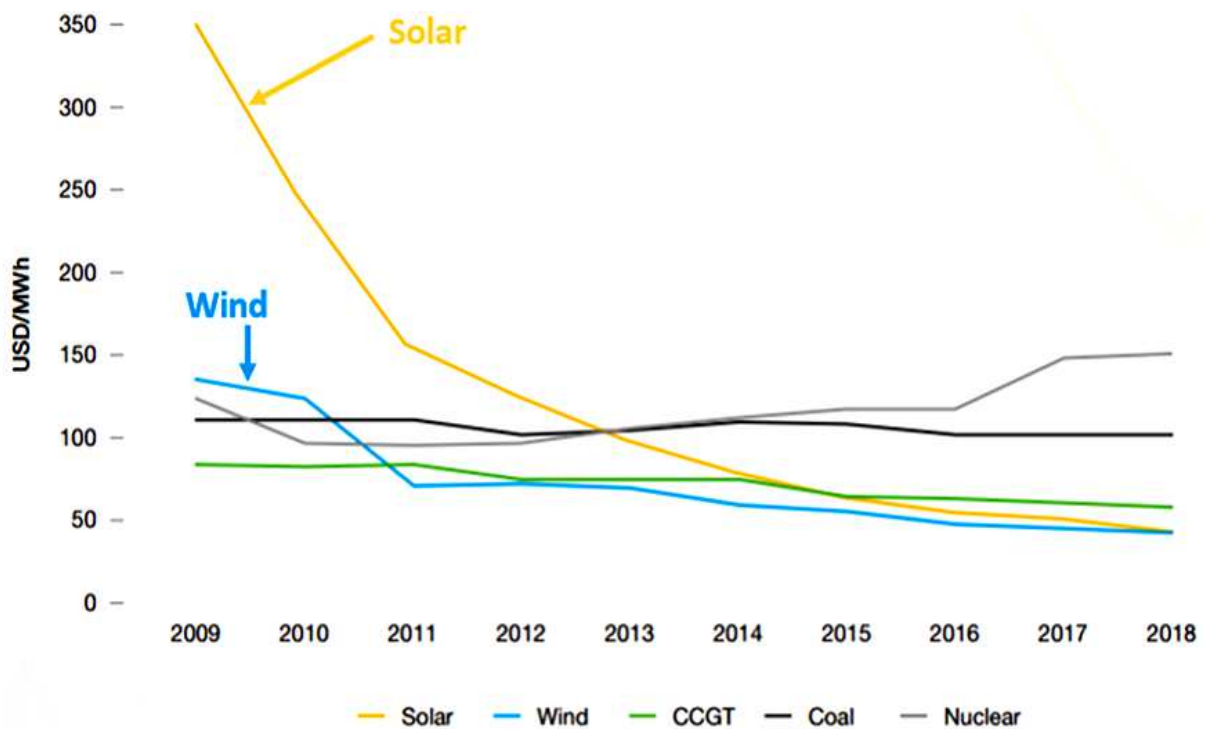


Figure I.67: Coût de la production d'électricité éolienne par rapport aux autres sources d'énergie 2009-2018 [22].

L'éolienne fournit généralement du CA utilisé avec un chargeur de batterie (conversion AC-DC) ou un redresseur si nécessaire pour fournir des charges en courant continu. Tout le flux d'énergie dans le système hybride est géré par un contrôleur qui régule le

flux d'énergie entre les bus AC et DC, en assurant un équilibre entre la puissance produite et consommée, en utilisant, si nécessaire, le stockage de la batterie.

#### I.4. Sources renouvelables Hybrides

Lors de la conception d'un système de télécoms, les ingénieurs essaient de se rapprocher le plus possible d'un chemin direct pour l'onde transmise au récepteur, une configuration appelée *fine de vue*. Des tours intermédiaires sont installées entre celle qui porte l'émetteur et celle qui contient le récepteur afin d'augmenter la visibilité et la distance de transmission. Ces tours agissent comme des relais en amplifiant la force du signal et parfois en changeant la fréquence [23].

En ce sens, l'alimentation électrique du système de télécoms est un critère important, et les énergies largement utilisées [24,25] sont les générateurs au propane et au diesel pour l'électricité et le mazout pour le chauffage direct.

Cependant, les énergies mentionnées ci-dessus ont des coûts élevés et croissants tels que le coût de l'entretien et du carburant, qui augmente linéairement pendant années, et le transport. L'environnement isolé [26] est un endroit inaccessible, et le transport par diesel, par exemple, est coûteux.

Si l'on ajoute l'impact écologique négatif de ces énergies, les systèmes d'approvisionnement en énergie dans un environnement isolé ont tendance à être remplacés par des renouvelables. Les systèmes industriels (systèmes de télécoms) dans un environnement isolé subissent le même effet. Lorsqu'il s'agit d'alimenter des systèmes peu consommateurs d'énergie électrique, lesd'énergie électrique, les panneaux photovoltaïques (PV) [27] sont privilégiés, pour autant que l'ensoleillement annuel du environnement isolé est suffisant [28]. Ils offrent également une grande modularité.

On peut en effet en combiner plusieurs en série pour augmenter la tension nécessaire à l'alimentation des charges ou en parallèle pour augmenter le courant disponible. Les technologies PV [29] sont de type monocristallin (rendement de 16% à 24%) ou polycristallines (rendement de 14% à 18%). Si le système est plus exigeant, l'énergie peut être fournie par des éoliennes, dont la puissance nominale peut atteindre de l'ordre du MW. Dans ce cas précis, une étude de la répartition du vent (simulation et campagne de mesure avec un mât équipé d'un anémomètre sur le site) devra être réalisée pour justifier l'utilisation de l'éolienne.

Il convient de noter que le système devrait inclure des batteries [30] pour stocker l'énergie fournie par l'éolienne ou le PV pour ensuite alimenter les charges. Si la puissance électrique requise est constante et importante, des solutions hybrides [31] sont adoptées. Par exemple, ils se composent de sources renouvelables avec un générateur diesel [32], qui prend le relais en cas de besoin. Le générateur diesel démarre lorsqu'il n'y a pas assez de vent pas assez de vent dans le cas d'une éolienne ou pas assez de soleil dans le cas d'un PV et lorsque les batteries sont presque vides. Un onduleur doit être ajouté lorsque la batterie ou le PV alimentent des charges AC.

L'éolienne fournit généralement du AC utilisé avec un chargeur de batterie (conversion AC-DC) ou un redresseur si nécessaire pour fournir des charges en courant continu. Tout le flux d'énergie dans le système hybride est géré par un contrôleur qui régule le flux d'énergie entre les bus AC et DC, en assurant un équilibre entre la puissance produite et consommée, en utilisant, si nécessaire, le stockage de la batterie.

De nombreuses solutions énergétiques pour les environnements isolés [33] ont émergé récemment. Il existe des solutions mobiles qui intègrent des panneaux photovoltaïques intégrés sur une structure, avec des éoliennes déployées lors de l'installation sur site.

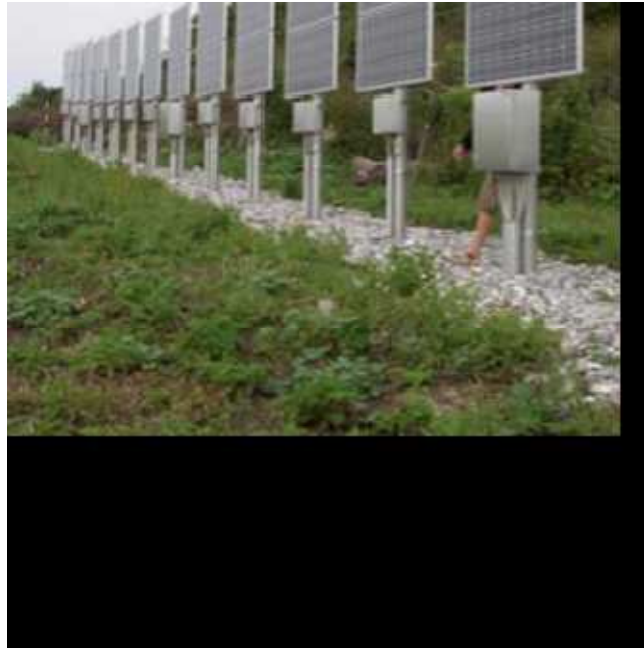
Le déploiement de ces solutions d'énergie renouvelable sur des sites isolés peut représenter de quelques centaines à plusieurs centaines de milliers de dollars selon la solution choisie :

- PV seul,
- Éolienne(s) seule(s), ou
- Systèmes hybrides (éolienne, PV, diesel et batteries).

Pour la mise en œuvre d'un système de télécoms en milieu isolé de type UHF par exemple, les puissances impliquées en termes de consommation de système (cartes électroniques) du côté de l'émetteur comme du côté du récepteur sont très faibles.

On peut choisir les PVs pour fournir de l'énergie renouvelable dans un environnement isolé pour alimenter un système de télécommunication seul [34]. Pour simplifier l'installation, réduire les coûts, et surtout éviter l'accumulation de glace et de neige sur les panneaux, les PV sont souvent placés verticalement, comme le montre figure I.7.

Certes, l'orientation n'est pas optimale par rapport au soleil, mais elle permet d'éviter le dépôt de givre ou l'accumulation de neige [36], ce qui réduit drastiquement le rendement du PV.



**Figure I.8 :**PV orienté verticalement [35].

En revanche, les drones de dimensions classiques conventionnels ne disposent pas de panneaux photovoltaïques puisque c'est leur batterie lithium-ion embarquée qui fournit l'énergie électrique. Ceci est très contraignant lorsque l'on souhaite déployer une flotte de drone pour assurer une couverture radio importante. L'autonomie de vol due aux batteries sont en moyenne de trois heures, ce qui condamne pratiquement l'utilisation des drones pour ce type de mission[36].

---

**I.5.References**

- [1] Frede Blaabjerg & Dan M. Ionel (2015) Renewable Energy Devices and Systems – State-of-the-Art Technology, Research and Development, Challenges and Future Trends, *Electric Power Components and Systems*, 43:12, 1319-1328, DOI: 10.1080/15325008.2015.1062819
- [2] <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC114005>
- [3] Hussain, Akhtar, Syed Muhammad Arif, and Muhammad Aslam. "Emerging renewable and sustainable energy technologies: State of the art." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71 (2017): 12-28. [4] Pan Y. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 2011;333:988–93.
- [5] Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. Department of Commerce; 2005. [6] Abbott, D., "Keeping the Energy Debate Clean: How Do We Supply the World's Energy Needs?," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 98, No. 1, pp. 42–66, January 2010.
- [7] Eize de Vries, "Close up – Vestas V164," 2014, available at: <http://www.windpowermonthly.com/article/1211056/close-vestas-v164-80-nacelle-hub>
- [8] Blaabjerg, Frede, and Dan M. Ionel. "Renewable energy devices and systems–state-of-the-art technology, research and development, challenges and future trends." *Electric Power Components and Systems* 43.12 (2015): 1319-1328
- [9] S. Roth, "World's Largest Power Plant Opens in California Desert," *USA Today*, February 10, 2015, available at: <http://www.usatoday.com/story/tech/2015/02/10/worldslargest-solar-plant-california-riverside-county/23159235/>
- [10] "SunPower Invests in the Smart Energy Home," 2015, available at: <http://newsroom.sunpower.com/2014-12-18-SunPower-Invests-in-the-Smart-Energy-Home>.
- [11] <https://www.alamy.com/infographic-about-renewable-energy-production-with-eco-power-generation-symbols-ecological-electricity-sources-in-flat-style-symbols-image371222588.html>. [12] <https://www.euractiv.com/section/energy-environment/news/bundestag-passes-amendments-to-germanys-renewable-energy-act/>
- [13] Sahli, A. Filtrage Actif et Contrôle de Puissances: Application Aux Systèmes Photovoltaïques Interconnectés au Réseau. Ph.D. Thesis, Ferhat Abbas Sétif University, El Bez, Algeria, 2018.



- [14] World Energy Ressources, World Energy Resources Council. 2016. Available online: <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf> (accessed on 19 October 2020).
- [15] Lee, C.H.; Kim, D.R.; Cho, I.S.; William, N.; Wang, Q.; Zheng, X. Peel-and-stick: Fabricating thin film solar cell on universal substrates. *Sci. Rep.* **2012**, *2*, 1–4.
- [16] Available online: <https://bindours.com/product/flex35-105w-5x7/> (accessed on 23 April 2021).
- [17] IRENA, REthinking Energy 2017: Accelerating the global energy transformation. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi (2017).
- [18] Darwish, A. S., & Al-Dabbagh, R. (2020). *Wind energy state of the art: present and future technology advancements. Renewable Energy and Environmental Sustainability*, *5*, 7. doi:10.1051/rees/2020003
- [19] IEA, Energy Technology Perspectives (International Energy Agency, 2014).
- [20] C.L. Archer, M.Z. Jacobson, Spatial and temporal distributions of US winds and wind power at 80m derived from measurements, *J. Geophys. Res. Atmos.* *108* (2003).
- [21] F.S. Energy, Cédric PHILIBERT Energy and Climate Change Analyst IEA (Atoms for the Future 2013) (2013). Retrieved from SlideShare: [https://www.slideshare.net/SFEN/cdric-philibert-energy-and-climate-change-analyst-ieaatoms-for-the-future?from\\_action=save](https://www.slideshare.net/SFEN/cdric-philibert-energy-and-climate-change-analyst-ieaatoms-for-the-future?from_action=save)
- [22] Get-invest.eu. (2019). Global Market Outlook 2019–2023. Retrieved from get-invest.eu: <http://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2019/05/SolarPower-Europe-Global-Market-Outlook-2019-2023.pdf>
- [23] Ferrier, Laurent, et al. "State of the Art of Telecommunication Systems in Isolated and Constrained Areas." *Sensors* *21.9* (2021): 3073.
- [24]. Issa, M.; Ibrahim, H.; Lepage, R.; Ilinca, A. A Review and Comparison on Recent Optimization Methodologies for Diesel Engines and Diesel Power Generators. *J. Power Energy Eng.* **2019**, *7*, 31–49.
- [25]. Darras, L.; Turpin, J.; Jenatton, L.; Mariscal, A. Utilisation d'une pile à Combustible au Méthanol en Complément de L'énergie Solaire Pour les Systèmes D'acquisition en Milieu Naturel. 2018. Available online: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01928269/> (accessed on 23 April 2021).

- [26]. Qamar, S.B.; Janajreh, I. Renewable energy sources for isolated self-sufficient microgrids: Comparison of solar and wind energy for UAE. *Energy Proc.* **2016**, *103*, 413–418.
- [27]. Motahhir, S.; El Ghzizal, A.; Derouich, A. Modélisation et Commande d'un Panneau Photovoltaïque Dans L'environnement PSIM.2015. Available online: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01351493/> (accessed on 23 April 2021).
- [28]. Casula, S.; Sanna, C.; Gawronska, M.; Damiano, A. Surface polarization effect and recovery process of crystalline-Si photovoltaic modules. In Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Birmingham, UK, 20–23 November 2016; pp. 364–369.
- [29]. Adar, M.; Mabrouki, M.; Bennouna, A.; Chebak, A. Production study of a grid connected PV plant. In Proceedings of the 2016 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech, Morocco, 14–17 November 2016; pp. 116–120.
- [30]. Damien Ernst, D. Les Batteries Vont Bouleverser Notre Quotidien, *Les Échos*. January 2017. in Press. Available online: <https://www.lecho.be/entreprises/energie/les-batteries-vont-bouleverser-notre-quotidien/9848658.html> (accessed on 3 October 2020).
- [31]. Fathima, A.H.; Palanisamy, K. Optimization in microgrids with hybrid energy systems—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *45*, 431–446.
- [32]. Corral-Rodriguez, R. Systèmes Hybrides Éolien-Diesel en Climat Froid: Le cas de la Base Antarctique Jubany. Master's Thesis, University du Québec a Rimouski, Rimouski, QC, Canada, 2012.
33. Kuang, Y.; Zhang, Y.; Zhou, B.; Li, C.; Cao, Y.; Li, L.; Zeng, L. A review of renewable energy utilization in islands. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *59*, 504–513.
- [34]. Bouallegue, M. Protocoles de Communication et Optimisation de L'énergie Dans Les Réseaux de Capteurs Sans Fil. Ph.D. Thesis, Université Bretagne Loire, Rennes, France, 2016.
- [35]. Available online: <http://www.thalesgroup.com/en/countries/europe/united-kingdom/markets-we-operate/defence/airsystems-uk/isr-air/watchkeeper> (accessed on 23 April 2021); Toffanin, Riccardo, Hua Ge, and Andreas Athienitis. "integration of building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system with heat recovery ventilators for improved performance under extreme cold climates." In *Cold Climate HVAC Conference*, pp. 97-110. Springer, Cham, 2018.

[36]. Meijer, G.C.; Wang, G.; Heidary, A. Smart Temperature Sensors and Temperature Sensor Systems. In Smart Sensors and MEMs; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2018; pp. 57–85. Available online:[https://www.researchgate.net/publication/323622487\\_Smart\\_temperature\\_sensors\\_and\\_temperature\\_sensor\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/323622487_Smart_temperature_sensors_and_temperature_sensor_systems) (accessed on 23 April 2021).

# *Chapitre II*

**Chaines d'Alimentation des Stations  
de Télécoms en Energie Electrique**

### II.1. Introduction

Dans les applications de télécommunication, une augmentation remarquable du nombre d'installations a été observée au cours de la dernière décennie, alors que le nombre d'abonnés est passé de 2 à plus de 6 milliards selon UIT(International Telecommunication Union:UIT). Le progrès dans le secteur des télécoms d'aujourd'hui est méconnaissable par rapport aux combinés en bakélite et les centraux téléphoniques habités il y a quelques décennies, aux technologies telles que le web, la large bande, LTE(Long Term Evolution), l'informatique en nuage, la VoD (Video on Demand), cloud computing, etc [1].



**Figure. II.1 :**Installation d'une BTS alimentée en hybride (PV et Oléen) [2]

Mais parfois, ces systèmes sont situés dans des zones très éloignées où l'alimentation en énergie est une préoccupation importante afin de garantir une qualité de service (QoS) remarquable en tout lieu et à tout moment. Le réseau mobile typique est composé de trois sections différentes :

1. Le centre de commutation mobile (Mobile Switching Center : MSC), qui s'occupe de la commutation et de l'interface avec le réseau fixe et d'autres réseaux [3].
2. La station de base radio (Radio Base Station : RBS) ou le système émetteur-récepteur de base (BTS), qui fonctionne entre le réseau et le terminal mobile et qui sert d'interface entre l'utilisateur et le réseau.
3. Les terminaux mobiles ou les stations mobiles, qui constituent la partie de l'abonné, c'est-à-dire les combinés mobiles et la carte SIM (Subscriber Identification Module).

## **Chapitre II    Chaines d'Alimentation des Stations de Télécoms en Energie Electrique**

Un site BTS typique nécessite une alimentation électrique de -48V. L'alimentation est prise avec une référence négative afin que le bruit n'affecte pas le système, car le bruit attaque toujours la polarité positive. La puissance d'entrée provenant de l'alimentation est introduite dans l'unité de distribution de puissance (Power Distribution Unit: PDU) distribuant l'énergie et de là, elle va au redresseur qui convertit l'alimentation AC en DC. Les figures II.2 et II.3 montrent un redresseur et une unité PDU typiques.



Figure II.2. Équipement de redressement sur le site de la BTS [1].



Figure II.3. Unité de distribution d'énergie (PDU) typique [1].

### **II.2. Technologie et consommation d'énergie**

Avec les progrès de la technologie et de conception des BTS, des systèmes moins gourmands

## **Chapitre II    Chaines d'Alimentation des Stations de Télécoms en Energie Electrique**

---

en énergie sont développés. Le remplacement de l'équipement existant, mais en conservant un générateur diesel comme solution d'alimentation, offre une analyse de rentabilité potentielle pour les opérateurs plus établis. En remplaçant les équipements anciens et inefficaces sur le plan énergétique, les exigences de charge du site de la station de base et un générateur de taille plus appropriée ou d'autres sources d'énergie peuvent être installés. La consommation d'énergie de la station de base du site provient principalement de l'équipement de la station, du refroidissement actif, de la liaison de retour, de l'éclairage et de la surveillance, tel qu'il existe de nombreuses approches pour réduire la consommation d'énergie [1].

### **II.3. Alimentation du réseau**

Il existe trois types de sites selon l'emplacement du réseau; qui sont:

1. Hors réseau : Lorsque le site de télécoms n'est pas alimenté par le réseau ou qu'il se trouve dans un endroit éloigné où l'on ne peut pas avoir accès au réseau électrique.
2. Réseau activé : Lorsque le site de télécoms est alimenté par le réseau électrique afin d'effectuer les opérations.
3. Réseau peu fiable : très courant dans les pays en voie de développement où l'alimentation de la station de base (BTS ici) provient du réseau électrique, mais l'opérateur ne peut pas compter uniquement sur l'alimentation du réseau, une alimentation de secours doit être prête à tout moment [1].

### **II.4. Alimentation en batteries**

Les batteries sont une source importante dans les solutions d'alimentation électrique hors réseau, et quand ceci n'est pas fiable. Les batteries de voiture au plomb ne sont pas utiles pour la sauvegarde du site de la station de base car elles fournissent de grandes rafales d'énergie. Au contraire, les systèmes de sites BTS nécessitent plutôt une batterie capable de fonctionner avec de multiples charges et décharges sur des périodes prolongées [1].

### **II.5. Alimentation électrique des générateurs Diesel**

La consommation de Diesel varie considérablement en fonction de l'utilité des générateurs diesel comme source d'énergie. Il existe des sites qui dépendent uniquement des groupes électrogènes car le réseau électrique n'est pas disponible. Une consommation approximative de carburant pour de tels sites est de 1500 litres/mois pour un DG de moins de 15 kVa. Certains facteurs affectent l'utilisation de la production décentralisée comme source d'énergie dans les zones hors réseau et les zones où le réseau n'est pas fiable.

L'opérateur peut gérer la distribution du carburant en interne ou par l'intermédiaire d'un distributeur et d'un vendeur externes. En général, les opérateurs préfèrent externaliser la distribution. Les coûts de distribution sont importants, ce qui entraîne d'une prime substantielle par rapport aux prix régionaux à la pompe. Dans un cas extrême, le coût de la distribution peut dépasser que le coût du carburant [1, 4-6].

### **II.6. Partage de sites**

Le partage de sites (Fig. II.4) améliore la viabilité économique de l'investissement dans l'infrastructure de réseau pour les sites ruraux à faible volume, et est défini comme le partage de l'infrastructure physique telle que l'espace, la tour, les ressources d'infrastructure, la sécurité, etc. par plusieurs opérateurs.

Les opérateurs individuels conservent la propriété de leurs équipements BTS de base et la propriété de leur réseau. Les infrastructures partagées peuvent être intéressantes dans les régions urbaines et rurales. Dans les zones urbaines où il y a plusieurs opérateurs et où il n'existe pas de bon espace libre pour installer l'infrastructure, le partage de site est une bonne option. Aussi, dans les zones rurales où le nombre d'abonnés et les revenus sont moindres, les opérateurs coexistent sur une seule et même infrastructure afin que le coût d'installation ne soit pas trop élevé[1, 4-6].



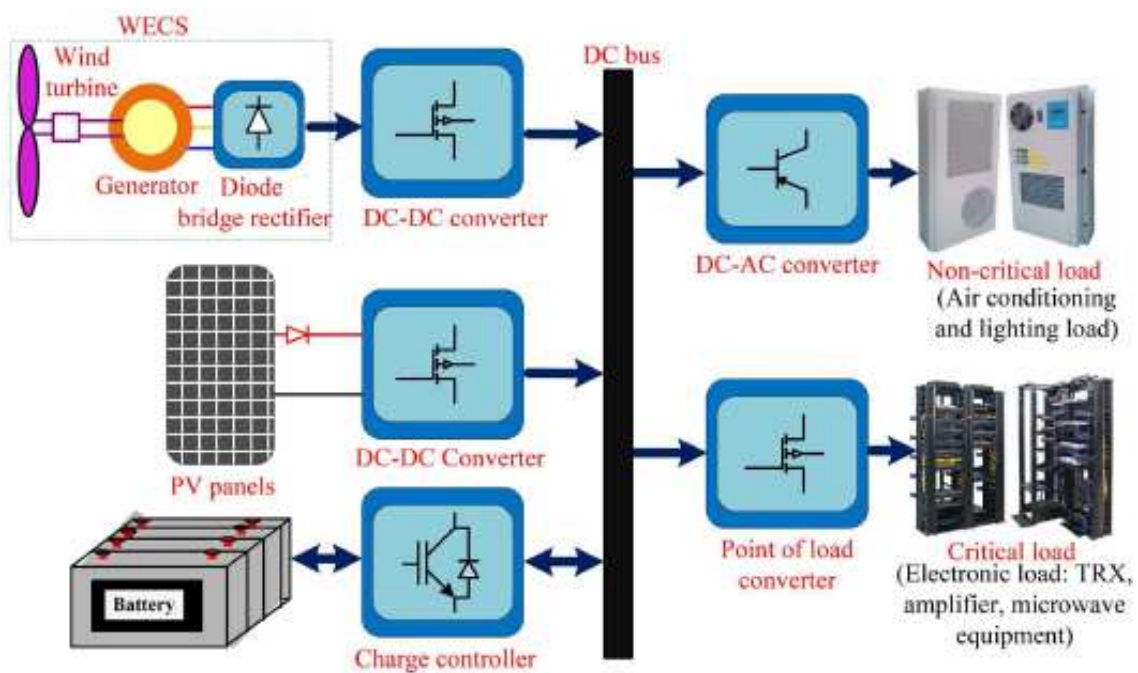
**Figure. II.4.** Tour montrant le partage

### **II.7. Micro-réseau DC basé sur l'énergie éolienne et photovoltaïque**

Le micro-réseau DC à base de ressources renouvelables pour une tour de télécoms consiste en un système de conversion de l'énergie éolienne et un panneau photovoltaïque avec des convertisseurs DC-DC comme générateurs d'énergie renouvelable, d'un système de



stockage d'énergie par batterie et d'un contrôleur de charge pour tamponner l'énergie l'intermittence de l'énergie éolienne et solaire. Le niveau de tension de la batterie de 400 V est choisi pour réduire la taille des conducteurs, car l'alimentation des télécommunications est un courant élevé à basse tension. Ainsi, un contrôleur de charge buck-boost bidirectionnel est utilisé. Un micro-réseau à courant continu avec un bus de 48 V fournit de l'énergie à différentes charges de la station BTS telles que l'unité micro-ondes, l'amplificateur et les émetteurs-récepteurs à un niveau de tension dans la plage de tension 12 et 1,1 V à l'aide de convertisseurs [7]. L'architecture du micro-réseau à courant continu proposé, basé sur l'énergie éolienne et le photovoltaïque, pour une tour de télécommunication, est illustrée à la figure II.5.



**Figure. II.5.** Architecture du système de micro-réseau DC basé sur les énergies renouvelables pour l'alimentation d'une tour de télécommunication [7].

### II.8 Modélisation du PV

On suppose que le panneau PV et le convertisseur DC-DC permettant de suivre la puissance maximale sont installés sur le site, et la production d'énergie des panneaux PV est fonction de la température ambiante et de l'irradiation solaire. Par conséquent, la puissance générée par les panneaux PV est modélisée en tenant compte de l'efficacité de conversion, et le facteur MPPT [7].

### **II.9 Modèle de système de conversion de l'énergie éolienne**

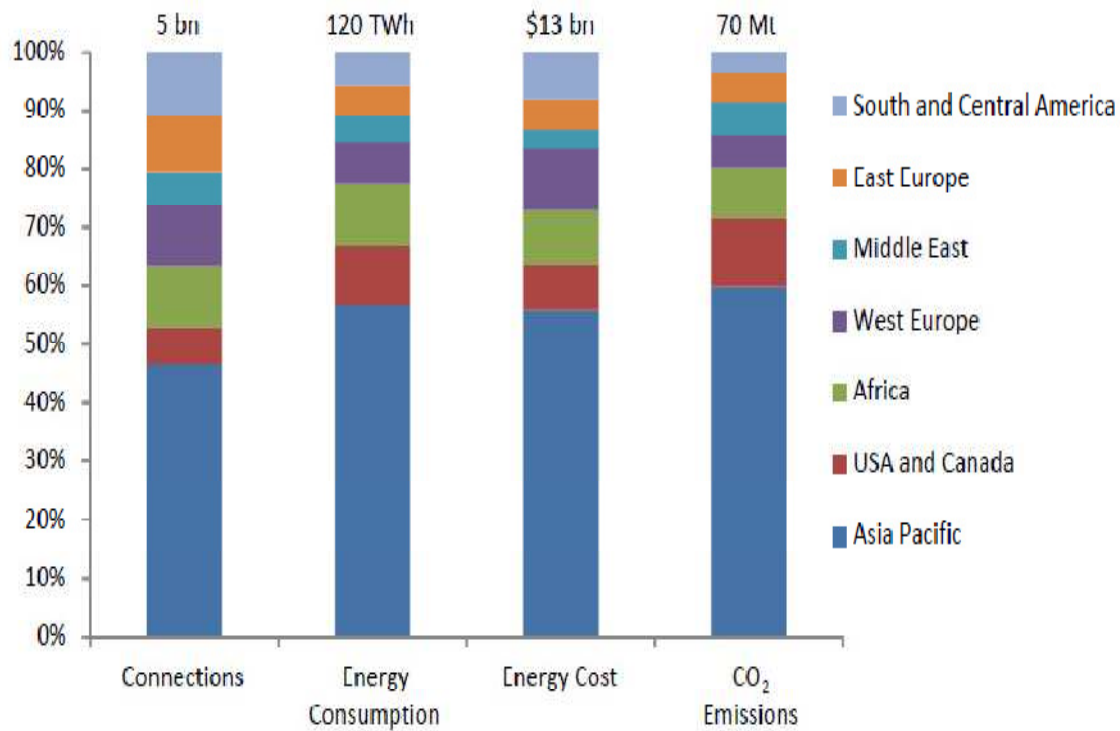
Le système de conversion de l'énergie éolienne est composé d'une éolienne variable, d'un générateur à induction à cage d'écureuil avec une banque de condensateurs pour fournir une puissance réactive, et un pont redresseur à diodes pour convertir le courant alternatif du générateur en courant continu. La puissance maximale du vent est extraite à l'aide d'un convertisseur DC-DC.

### **II.10 Risques liés au développement durable dans la chaîne d'approvisionnement des entreprises de télécoms**

L'industrie des télécoms a bénéficié de taux de croissance élevés dans le monde et son réseau est l'une des industries qui a fait de grands efforts en matière de développement durable, qui a fait de grands efforts pour le développement durable [8].

Cependant, la pollution environnementale est l'un des problèmes les plus graves de cette industrie, en termes d'énergies durables; D'où l'utilisation de technologies en bout de chaîne qui est un investissement de lutte contre la pollution qui devrait être entrepris conjointement entre les entreprises de télécoms et les fabricants ou fournisseurs. Ainsi, la prendre en considération l'importance de fournir des services à haut débit et haute fiabilité dans le secteur des télécoms et de l'intensité de la concurrence dans ce secteur, la durabilité de la gestion de la chaîne d'alimentation a pris une importance considérable. Pour ces raisons, les risques liés à la durabilité de la chaîne d'alimentation des télécoms doivent être correctement identifiés [9].

L'énergie totale par unité de trafic a diminué d'environ 20% et l'énergie par connexion a diminué de 5%, ce qui indique les progrès des industries en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre. La figure II.6. montre la consommation d'énergie de la consommation d'énergie des réseaux mobiles dans le monde [10].

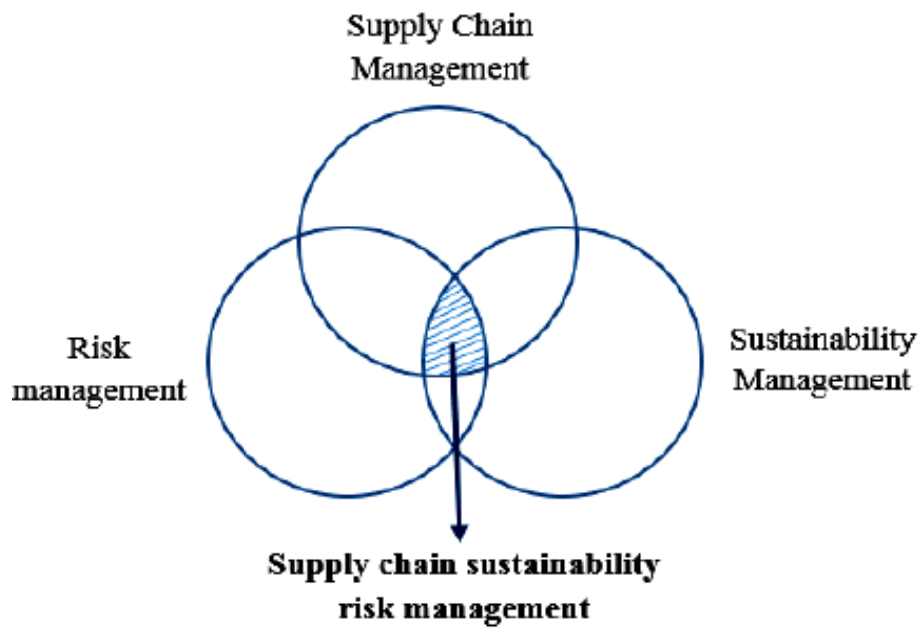


**Figure.II.6.** Consommation d'énergie par les réseaux mobiles [10].

les principales questions auxquelles il faut répondre sont: [10]

1. Compte tenu des dimensions du développement durable et des différentes parties de la chaîne d'approvisionnement, quels risques menacent la stabilité de la chaîne d'approvisionnement dans les entreprises de télécoms ?
2. Parmi les risques identifiés, lequel a le plus grand impact sur la durabilité de la chaîne d'alimentation de ces entreprises ?
3. Quelles sont les causes profondes et les conséquences potentielles de chacun des risques identifiés ?
4. Quelles stratégies sont efficaces pour faire face à ces risques ?

Ces lacunes dans la recherche nous ont encouragés à développer un nouveau gestion des risques liés à la durabilité de la chaîne d'alimentation (Fig.II.7) et à l'appliquer à la chaîne d'alimentation des entreprises de télécoms et à fournir une méthode scientifique de gestion de ces risques aux gestionnaires de la chaîne d'alimentation [10].



**Figure.II.7.** Risques liés à la durabilité de la chaîne d'alimentation et chevauchement entre la gestion durable, la gestion de la chaîne d'alimentation et la gestion des risques et les chevauchements entre la gestion durable, la chaîne d'alimentation et la gestion des risques [10].

Les pratiques suivantes peuvent être utiles pour optimiser l'énergie dans les communications mobiles:

1. Le réseau doit être constitué de quelques sites seulement tout en maintenant la couverture, la capacité et la qualité souhaitées.
2. L'efficacité énergétique doit être optimisée, qu'il s'agisse d'un site entier ou d'un produit particulier.
3. L'utilisation de sources d'énergie renouvelables doit être encouragée, notamment l'énergie solaire, l'énergie éolienne, les piles à combustible, etc [10].

La transition vers l'énergies renouvelable est nécessaire pour atteindre l'efficacité énergétique et la durabilité environnementale. Ainsi, pour préserver les intérêts des générations futures, le développement durable est indispensable. Fig. II.8. explique les facteurs qui contribuent à l'énergie durable [11].



**Figure. II.8.**Facteurs contribuant à l'énergie durable [10].

### II.11. Analyse du cycle de vie des BTS sans fil: Avantages et inconvénients

L'évaluation du cycle de vie peut être utilisée comme un outil pour analyser les différents effets de tout produit ou service sur l'environnement: méthode standardisée facilitant le processus de prise de décision en aidant le gouvernement à définir une politique pour le public; L'évaluation du cycle de vie dépend de la géographie, les résultats changent avec le changement de zone. Les résultats changent avec le changement de zone et l'analyse de l'ensemble des paramètres est nécessaire pour préparer des données. De plus, l'intérêt des parties prenantes joue également un rôle important car elles ont des points de vue différents sur la chaîne d'alimentation à un niveau horizontal et vertical. Il est à noter que l'évaluation du cycle de vie de vie représente une alternative prometteuse pour analyser, interpréter et essentiellement ajuster la performance environnementale des BTS de télécoms [11].

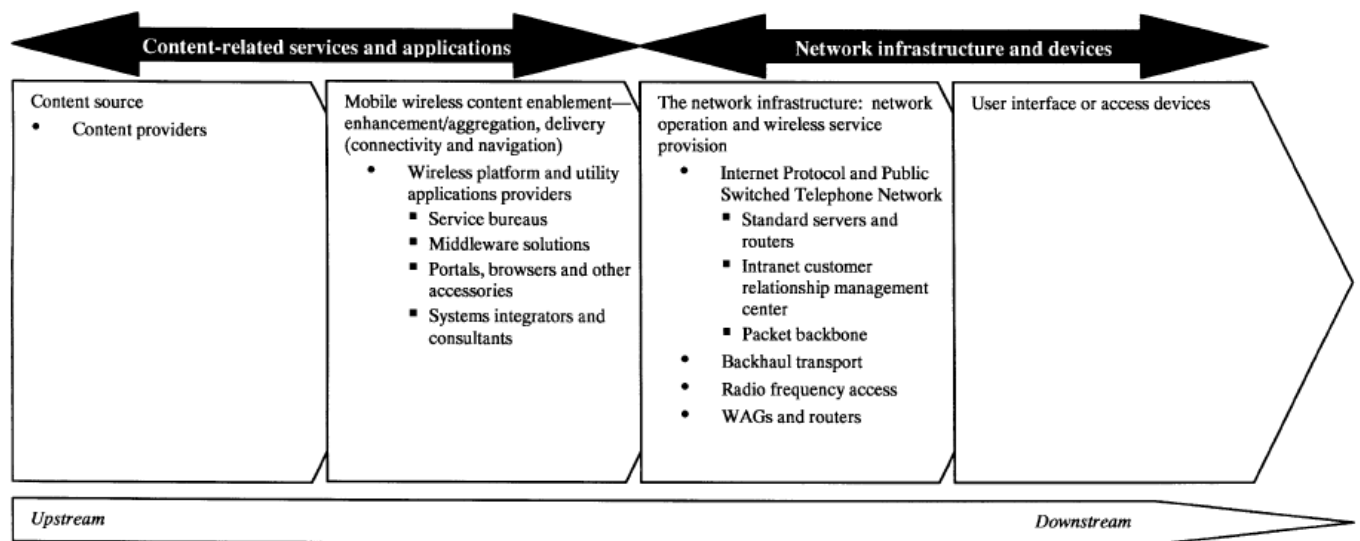
### II.12. Evolution de la chaîne de valeur et de la structure du marché du sans fil mobile

Le réseau central est constitué d'un système de commutation comprenant un centre de commutation mobile (Mobile Switching Center: MSC) - qui achemine les appels et maintient le profil de l'utilisateur et l'authentifie, et des passerelles. Le Réseau d'accès radio (Radio Access Network: RAN) est constitué d'un système de station de base (Base Station System: BSS), qui comprend des contrôleurs de station de base (Base Station Controllers: BSC) et des stations émettrices-réceptrices de base (Base Transceiver Stations: BTS). La BSS exécute efficacement toutes les fonctions radio pour allouer des ondes aux différents abonnés mobiles et pour envoyer et recevoir leurs signaux dans un rayon environnant (ou cellule). La station mobile (Mobile Station: MS) comprend les combinés mobiles. La partie "backhaul" d'un réseau mobile fait référence au transfert du trafic vocal et de données de la station BTS au BSC ou entre les stations BTS si les stations de base sont en guirlande. Par exemple, le long d'une grande autoroute. Pour transmettre les données du monde filaire vers le réseau mobile sans fil, les passerelles d'accès sans fil (Wireless Access Gateways: WAG)

## Chapitre II Chaînes d'Alimentation des Stations de Télécoms en Energie Electrique

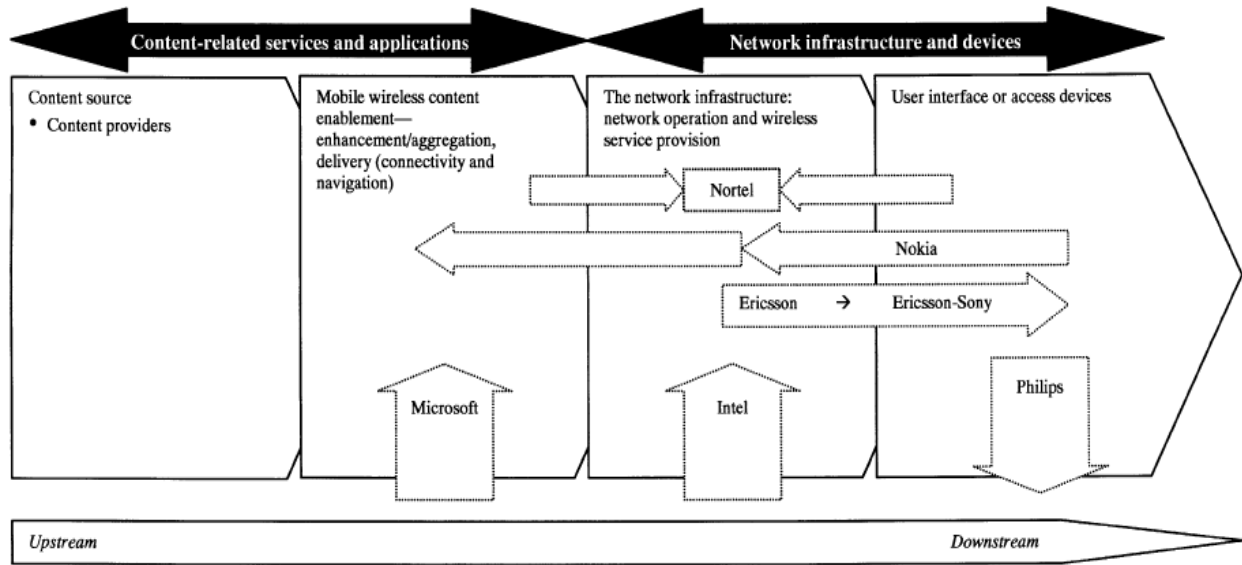
disposent de passerelles à commutation de circuits pour les données à commutation de circuits et de passerelles à commutation de paquets pour les données à commutation de paquets [12].

L'analyse et l'organisation des acteurs établis et émergents de l'industrie en fonction de leurs offres nous permettent de déterminer l'état actuel de l'évolution de la chaîne de valeur et de ses éléments. Dans l'état actuel de l'évolution, alors que les fonctions traditionnelles de la chaîne de valeur sont encore exécutées par un mélange d'acteurs existants et nouveaux, elles sont plus facilement identifiables en deux nouveaux grands segments. Ces deux grands segments de la chaîne de valeur en évolution sont les suivants et applications liés au contenu, et l'infrastructure de réseau et les dispositifs d'accès (Fig. II.9).



**Figure. II.9.** Chaîne de valeur du sans fil mobile. [12].

De nombreuses entreprises ont des trous dans leur gamme de produits qui doivent être comblés, tandis que d'autres s'efforcent de concentrer leurs ressources sur les points forts existants. Par exemple, n'ayant pas réussi à s'établir sur le marché des téléphones, Ericsson a remplacé son entreprise individuelle par une coentreprise avec Sony, le géant de l'électronique grand public. Sony, appelée Sony-Ericsson Mobile Communications. En faisant équipe, ils défient les leaders du secteur, Nokia et Motorola, qui contrôlent environ la moitié de la part de marché mondiale (Fig. II.10) [12].



**Figure. II.10.** Dynamique concurrentielle dans la chaîne de valeur du sans-fil mobile [12].

Les informations relatives à la mesure du coût total peuvent être utilisées dans un certain nombre de domaines. Les données permettent de quantifier et de communiquer les zones de non-performance, afin de concentrer les efforts d'amélioration de la performance. Les informations sur le coût total sont également utilisées lors des négociations pour identifier les domaines nécessitant une l'amélioration de la performance contractuelle. Ces informations contribuent également au processus global de sélection des fournisseurs en fournissant des données historiques sur la performance et un moyen de classer la performance des fournisseurs/distributeurs, ce qui est particulièrement utile si une entreprise réduit sa base d'alimentation: une approche structurée du coût total peut permettre à une société acheteuse de récupérer les coûts de non-performance par le biais de participants non performants [13].

### II.13. Éléments du coût total

Pour utiliser l'approche du coût total, les principaux coûts du produit ou du service à gérer doivent être identifiés, définis et mesurés. Lorsqu'il est utilisé efficacement, le concept de coût total de la chaîne d'approvisionnement est un puissant moteur de la stratégie [13].

### II.14. Coût total de la chaîne d'alimentation

Une entreprise fournit des services de fabrication intégrés et personnalisés qui couvrent les trois étapes du cycle de vie du produit, notamment la préfabrication, la fabrication et la post-fabrication. Ces services sont intégrés à un point tel que cette entreprise

## Chapitre II Chaînes d'Alimentation des Stations de Télécoms en Energie Electrique

est responsable de tous les processus de la chaîne d'approvisionnement associés à l'approvisionnement en pièces, de production et de distribution de produits électroniques et de systèmes pour presque tous les grands fabricants d'équipements originaux du secteur des télécoms, des réseaux, des systèmes informatiques, des périphériques, semi-conducteurs, l'électronique grand public, les équipements industriels, l'électronique médicale, l'avionique et l'électronique automobile [13].

### II.15. Commutateurs WAN

Tous comme les routeurs, les commutateurs WAN aident à gérer le flux de grandes quantités de données entre les sites. Ils se distinguent par leur utilisation de protocoles de (ATM et Frame Relay au lieu de l'IP sans connexion); certains produits hybrides commutateur/routeur assurent les deux fonctions [13].

Les protocoles orientés connexion offrent une plus grande souplesse pour l'allocation de la bande passante et les applications de qualité de service définies par rapport à l'IP brut, mais ils ne sont pas toujours nécessaires pour les applications Internet publiques [13].

Les commutateurs WAN sont généralement de gros appareils utilisés par les opérateurs téléphoniques, ou les entreprises haut de gamme, et ils occupent une grande partie d'un rack. Souvent, ils fonctionnent sur 48V DC, comme les équipements de télécoms, contrairement aux routeurs (qui utilisent principalement du CA). L'équipement de réseau informatique consomme 6,4 TWh d'électricité (figure II.11), soit seulement environ 6 % de toute l'électricité consommée par les bureaux et les équipements de télécoms.

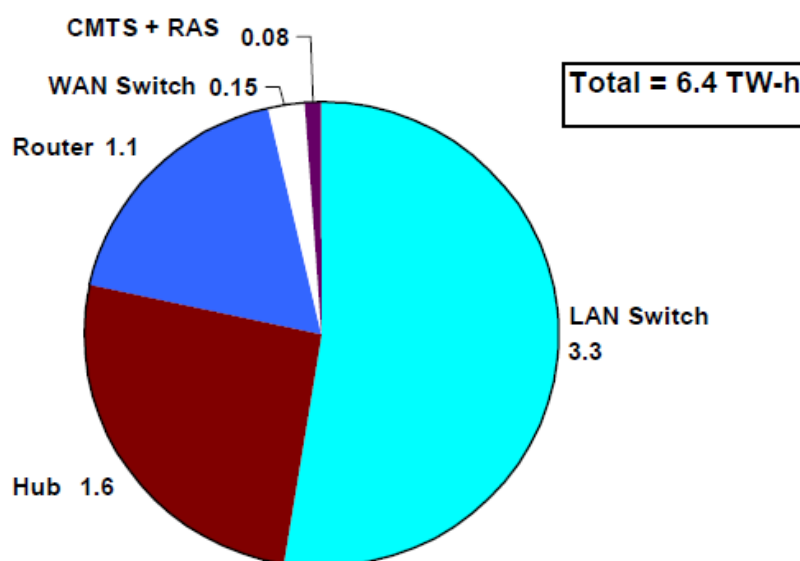


Figure. II.11. Consommation annuelle d'électricité d'un équipement de réseau (TW-h).



### **II.16. Impacts indirects de la consommation d'énergie des équipements de télécoms**

En plus de leur impact direct sur la consommation d'électricité, les équipements de bureau et de télécoms ont un impact indirect sur la consommation d'énergie et sur le développement durable et l'environnement de plusieurs manières. Un examen très préliminaire de l'impact indirect des équipements de télécommunications sur la consommation énergétique montre que la somme des impacts est au moins du même ordre de grandeur que la consommation d'énergie directe de l'équipement. La chaleur dissipée par les équipements de télécoms a une incidence sur les charges de refroidissement et de chauffage des compartiments de près, et son ampleur dépend du type du compartiment et de sa situation géographique [13].

Pendant la saison de refroidissement, la chaleur dissipée par les équipements de télécoms augmente les charges de climatisation de 0,2 kW à 0,5 kW par kW de consommation électrique des équipements de bureau et de télécoms. Les équipements de télécoms augmentent également la demande d'énergie de pointe d'au moins trois façons pour une raison ou une autre comme suit:

1. Premièrement, la consommation électrique de l'équipement pendant les périodes de pointe augmente l'appel de puissance de pointe.
2. Deuxièmement, la chaleur dissipée par les équipements de télécoms pendant les périodes de pointe, augmente les charges de climatisation de pointe générées par les équipements de bureau et de télécoms.
3. Troisièmement, les faibles facteurs de puissance de la plupart équipements de télécoms augmentent la demande d'électricité ainsi que les pertes de transmission et de distribution, ce qui augmente la quantité de production d'énergie nécessaire à la centrale.

Globalement, les équipements de bureau et de télécoms sont susceptibles augmenter de 3 à 4 % l'appel de puissance de pointe dans une région surtout éloignée.

Les équipements de télécoms pourraient avoir un impact mesurable sur la consommation d'énergie en augmentant la productivité de l'ensemble de l'économie pour améliorer le taux de croissance durable et en améliorant l'efficacité de l'utilisation de l'énergie.

En pratique, comme le commerce électronique n'ont encore qu'une exploitation minime à l'échelle de l'ensemble de l'économie et que l'effet éventuel des équipements de

bureau et de télécoms sur la consommation énergétique nationale reste incertain. Cela suggère également qu'il faudra un certain temps avant que le commerce électronique n'ait un impact majeur sur la consommation d'énergie [13].

### **II.17. Références**

- [1] Saxena, Tushar, J. S. Jadon, and M. Student. "Different Power Supply Planning Options Available for A BTS Site." *International Journal of Engineering, Business and Enterprise Applications* (2013): 13-342.
- [2] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.71>
- [3]. Global Telecom broucher 'Telecom power solutions', Cummins power generation. Pp 2-3.
- [4]. Carmine Lubritto "Telecommunication Power System: energy saving, renewable sources and environmental monitoring", Department of Environmental Science, II University of Naples ITALY.
- [5]. Boccaletti C.; Fabbri G. & Santini E. (2007). Innovative Solutions for Stand Alone System Powering, Proceedings of INTELEC, pp. 294-301, 978-1-4244-1628-8, Rome (Italy) September 2007, IEEE, Rome
- [6]. IPCC, Fourth Assessment Report (AR4) Climate Change 2007 – International Panel of climate Change, 2007.
- [7]. Kaur, Rajvir, Vijayakumar Krishnasamy, and Nandha Kumar Kandasamy. "Optimal sizing of wind–PV-based DC microgrid for telecom power supply in remote areas." *IET Renewable Power Generation* 12.7 (2018): 859-866.
- [8]. Ahmadi, H. B., Petrucci, S. H. H., & Wang, X. (2017). Integrating sustainability into supplier selection with 21 analytical hierarchy process and improved grey relational analysis: a case of telecom industry. *The 22 international Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90(9-12), 2413-2427.
- [9]. Fatemeh Valinejad, Donya Rahmani, Sustainability risk management in the supply chain of telecommunication companies: A case study, *Journal of Cleaner Production*, 203, 2018, 53-67. [doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.174](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.174).
- [10]. Kumar, Mr Amit, et al. "Life cycle assessment of wireless bts to reduce carbon footprints." *Energy Procedia* 52 (2014): 120-125; GSMA. *Mobile's Green Manifesto*; 2012. [On-line]. Available: <http://www.gsma.com/publicpolicy/wpcontent/uploads/2012/06/Green-Manifesto-2012.pdf>.
- [11]. Kumar, A.; Singh, T.; Khurana, D.; *Energy optimization in wireless communication network through renewable energy sources (RES)*. Power Electronics (IICPE), 2012 IEEE 5th India

## **Chapitre II    Chaines d'Alimentation des Stations de Télécoms en Energie Electrique**

---

International Conference, vol., no., pp.1,5, 6-8 Dec. 2012; Amritpal Singh, Tanvir Singh, Amit Kumar. *Engineering Innovations for Environment and Energy Sustainability*.IJREAS(International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences), Vol. 2 Issue 2, February 2011. [12].

Sabat, Hemant Kumar. "The evolving mobile wireless value chain and market structure."*Telecommunications policy* 26.9-10 (2002): 505-535. [13]. Roth, Kurt, Fred Goldstein, and Jonathan Kleinman. "Energy consumption by office andtelecommunications equipment in commercial buildings volume I: energy consumption baseline." National Technical Information Service (NTIS), US Department of Commerce, Springfield, VA 22161 (2002).

# *Chapitre III*

**Outils de Modélisation et Simulation  
des Chaînes Alimentant les Stations  
BTS**

### III.1. Introduction

Il y a plusieurs outils logiciels communs utilisés pour concevoir et évaluer les performances réalisables du système de micro-réseau hybride; Grâce à l'utilisation de logiciels de simulation et d'optimisation, la configuration optimale du système de micro-réseau hybride conçu peut être atteinte, et à la comparaison du coût de production de l'énergie et des performances de plusieurs configurations du micro-réseau hybride [1].

HOMER (HybridOptimisation of Multiple Energy Resources) est un outil ayant une capacité de traitement des données à l'heure, fournit une représentation graphique des résultats, facile à comprendre et à utiliser convivial.

De plus, il est facile à utiliser car il est un logiciel basé sur la technologie, et est la base des données météorologiques de la NASA uniquement et une solide base de données de produits. Mais en contrepartie, dans l'outil HOMER, les données de la série chronologique sous forme de moyenne journalière ne peuvent pas fiabilité réalisées. En outre, cet outil ne dispose pas de certaines options d'importation options d'importation de données, a moins options d'entrée de données, a des options limitées options de recherche, d'extraction et de visualisation.

Dans cette étude, HOMER pour les HRES est utilisé pour exploiter leur avantage inhérent qui, en retour, réduisent les émissions de gaz à effet de serre et les coûts opérationnels associés aux générateurs diesel utilisés pour alimenter les BTS dans les zones rurales. Donc, les HRES contribueront à améliorer la stabilité, la fiabilité et la durabilité de l'alimentation électrique pour répondre aux charges requises des BTS.

HOMER couplé à l'outil logiciel Matrix Laboratory (MATLAB) ont été sélectionnés pour les processus de simulation des HRES. Deux variables sensibles ont été introduites dans les codes écrits et l'outil HOMER disponible. Ceci a été fait afin d'obtenir un résultat optimal. Ces deux variables sensibles sont l'angle d'inclinaison du PV et la hauteur du moyeu de l'éolienne.

Ce chapitre présente la méthodologie employée dans l'outil d'optimisation pour détailler les zones d'étude, la collecte des ensembles de données climatiques nécessaires à ce problème d'optimisation, le profil de la charge, le prétraitement et la modélisation des données.

### III.2. Logiciel HOMER

Les présomptions et les stratégies utilisées pour préparer le logiciel HOMER sont examinées en profondeur en ce qui concerne la fonction objective du coût actuel net (Net Present Cost : NPC) et les émissions de gaz à effet de serre du système. Enfin, l'algorithme de contrôle utilisé pour authentifier les résultats du logiciel HOMER est décrit.

Le logiciel HOMER est l'outil d'optimisation et de simulation le plus largement utilisé et qu'il fournit une représentation graphique efficace des résultats lorsqu'il s'agit du dimensionnement optimal des HRES. Dans ce travail de thèse, HOMER a été sélectionné pour l'optimisation et la simulation du HRES proposé en fonction de ses capacités. À la connaissance des auteurs, il s'agit de la première étude portant sur les systèmes HRES qui peuvent alimenter une BTS dans les zones rurales d'Algérie. Parmi les différents logiciels, HOMER a été sélectionné pour l'optimisation et la simulation du HRES proposé dans cette étude. HOMER est largement utilisé pour simuler et optimiser des systèmes de chauffage, ventilation et climatisation, et peut effectuer une analyse de sensibilité, une optimisation et une simulation de tout système conçu. Les calculs du bilan énergétique sont effectués dans le processus de simulation en fonction de la configuration du système proposé; Une liste de configurations après le processus d'optimisation est présentée et classée en fonction de leur NPC. Les coûts de remplacement, d'installation, de combustible, d'exploitation et de maintenance ainsi que l'intérêt réel du système proposé sont inclus dans les calculs d'optimisation. Les facteurs variables, et les coûts du combustible sont déterminés par l'analyse de sensibilité [2].

HOMER a été capable d'évaluer différentes conceptions comme un système électrique connecté au réseau et un système autonome. Diverses formes de graphiques et de tableaux sont présentées dans les résultats de la simulation. Ces graphiques et tableaux montrent les performances des systèmes proposés par rapport aux autres configurations. Cela permet de comparer et d'évaluer les résultats en fonction des objectifs stipulés par les concepteurs du système proposé. HOMER est capable de dimensionner de manière optimale les composants d'un HRES. HOMER a également effectué dans notre étude une comparaison entre deux stratégies de répartition simples, et utilise deux stratégies de répartition pour déterminer comment le système charge le banc de batteries. Les stratégies de répartition comprennent la stratégie de suivi de la charge et la stratégie de charge cyclique.

### III.3. Modèles Mathématiques des Composants de Systems dans HOMER

Pour un modèle PV dans HOMER, l'équation (III.1 suivante), utilisée pour calculer la puissance PV de sortie.

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left( \frac{G_T}{G_{T,STC}} \right) \cdot [1 + \alpha_p (T_C - T_{C,STC})] \quad (III.1)$$

Où,  $Y_{PV}$  est la capacité nominale du PV dans des conditions d'essai normalisées (STC) en kW,  $f_{PV}$  est le facteur de déclassement du PV,  $G_T$  et  $G_{T,STC}$  sont respectivement l'indice d'intensité lumineuse ( $I_s$ ) incident sur le réseau PV au cours du pas de temps actuel en  $\text{kW/m}^2$  et l'IS incident dans des conditions STC en  $1 \text{ kW/m}^2$ ,  $T_C$  et  $T_{C,STC}$  sont la température des cellules PV au cours du pas de temps actuel en  $^\circ\text{C}$  et la température des cellules PV dans des conditions STC à  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $\alpha_p$  est le coefficient de température de la puissance en  $\%/^\circ\text{C}$ . L'expression suivante est utilisée pour calculer la température de la cellule PV.



**Figure. III.1.** Station BTS en télécom, alimentée par un HRES [ 3].

### III.4. Exemple de simulation de l'alimentation d'une BTS par HOMER

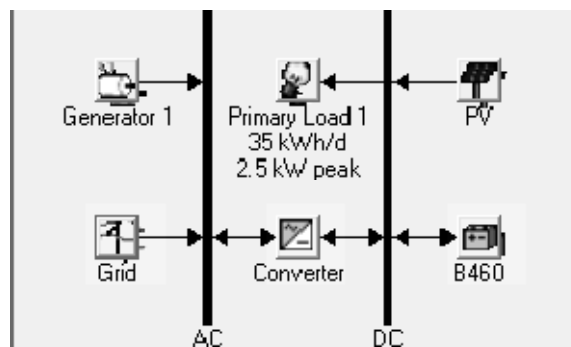
Les modèles de systèmes d'alimentation basés sur les énergies renouvelables pour l'alimentation des sites BTS autonomes sont exploités par le biais d'une simulation par

HOMER. L'objectif principal doit être la vérification de la faisabilité de l'utilisation de l'énergie solaire pour les sites BTS connectés au réseau qui peuvent remplacer les systèmes d'alimentation électrique basés sur les générateurs diesel qui sont actuellement placés. Pour cela, on propose un modèle basé sur l'utilisation d'une batterie PV avec un générateur diesel de petite taille et un convertisseur pour l'alimentation de secours pendant les heures de délestage [4].

La simulation est effectuée pour deux systèmes : l'un avec un système d'alimentation de secours traditionnel qui consiste en un grand générateur de courant continu (12 KW ou plus), système traditionnel pour faire face aux pannes de courant, un autre avec notre système proposé et les résultats et la comparaison entre les deux sont présentés pour différentes durées de délestage quotidien (11~12 heures).

### III.4.1. Modélisation du système proposé

L'architecture de base de la solution solaire PV-Batterie-Convertisseur, solution exemplaire basée sur un générateur suggérée, est présentée dans la Fig. III.2.



**Fig.III.2 :** Système solaire PV-batterie pour une BTS connecté au réseau.

L'énergie électrique générée par les cellules solaires PV est soit pour alimenter la batterie pour le stockage lorsque le réseau fournit de l'énergie à la station BTS pendant la journée, soit elle alimente directement à la charge de la BTS par le biais d'un contrôleur de charge en cas de délestage. L'énergie stockée dans la batterie alimente la charge en cas de panne de courant la nuit. Le générateur Diesel (DG) est également utilisé dans le modèle comme alimentation de secours secondaire, car les panneaux PV ne sont pas une source d'énergie fiable à 100 % [4].

Comme dans d'un climat nuageux ou pluvieux, pendant la période hivernale, l'énergie électrique produite par les cellules SPV peut être très faible, ce qui peut causer des problèmes



de sécurité. Et, pour traiter les problèmes d'incapacité de l'énergie solaire à répondre à la demande de charge, un DG de taille plus petite que celle utilisée actuellement dans les sites de télécommunication est ajouté au système modélisé afin qu'ils puissent fournir de l'énergie lorsque l'énergie solaire PV et la batterie ne parviennent pas à alimenter la charge. Il convient de noter que le générateur est à courant alternatif (AC) et que la charge de la BTS est à courant continu (DC). Donc, un convertisseur supplémentaire, effectuant la conversion AC/DC est utilisé, ceci effectue également le conditionnement de l'énergie comme la régulation du flux d'énergie de chacune des sources, agissant comme contrôleur de charge ou augmentateur de puissance [4].

### III.4.2. Cellule solaire photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est le composant de base de tout système solaire, qui fonctionne en convertissant l'énergie optique des photons incidents en énergie électrique par effet photovoltaïque. Plusieurs cellules solaires sont connectées ensemble pour former un module solaire PV. Le photocourant généré à la source de courant est fonction du rayonnement incident de la cellule solaire et de la température. L'augmentation du rayonnement solaire entraîne une augmentation de la sortie de la cellule solaire, et sa diminution entraîne une diminution de la sortie. Pour la présente simulation, la taille choisie du panneau solaire PV était de 2,5 KW [4, 5].

### III.4.3. Batterie

La batterie est utilisée pour stocker la charge avec une plus grande efficacité. Alors que la charge stockée dans la batterie sert à alimenter la charge pendant la nuit ou les heures de délestage.

Pour maintenir une tension constante à travers la charge, la batterie peut fournir la solution ultime, où plusieurs batteries peuvent être organisées en série ou en parallèle pour répondre à la tension et au courant nominaux nécessaires. dans cette simulation exemplaire, des batteries de 460 Ah, 6v sont utilisées et 8 d'entre elles sont placées en série afin d'atteindre la tension requise de – 48v DC requise par le BTS. Ici, 16 batteries dans 2 chaînes parallèles sont utilisées [4].

### III.4.4. Convertisseur

Un convertisseur est utilisé pour transformer le courant alternatif en courant continu ou vice versa, tandis que le DG utilise une alimentation en courant alternatif et la charge a

besoin de courant continu. Il existe différents types de convertisseurs utilisés en télécommunications, tels que le convertisseur Buck, connu aussi par *Convertisseur Step Down*.

### III.4.5. Générateur Diesel (DG)

L'utilisation d'un générateur présente de nombreux inconvénients, et pour y remédier il faut qu'il soit fonctionnel pendant la période la plus courte possible, quoique le prix du diesel actuellement aux pays exportateurs de pétrole (comme l'Algérie) est disponible avec un prix beaucoup moins cher même dans les endroits éloignés mais polluant, bien que le transport et le stockage du diesel vers ces sites éloignés restent de gros problèmes. En plus, la perturbation créée par le bruit du générateur est également un facteur défavorable. La taille du générateur utilisé pour la modélisation de ce système exemplaire est estimée de 4 KW.

### III.4.6. Réseau électrique

Le réseau électrique reste la source d'électricité la moins chère. Cependant, comme l'Algérie est un pays très enclin aux délestages et souvent il ya des coupures de courant électrique des durant heures par jour parfois, on ne peut donc pas s'y fier uniquement et se confier au réseau.

### III.4.6. Résultats de simulation avec HOMER dans une zone éloignée choisie

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electrical Renewable) utilisé pour la simulation du modèle proposé [6], facilite la mission d'estimation de la conception des connexions en réseau et hors réseau: estimation des conceptions des connexions en réseau et hors réseau des systèmes d'alimentation électrique raccordés pour différentes fonctions. Si on fournit à HOMER les informations lui indiquant les différentes alternatives technologiques, les dépenses d'équipement et la disponibilité des sources, il nous donne les résultats sur la base de ces données des résultats par le calcul. Dans cette simulation exemplaire, une comparaison des deux modèles de BTS a été présentée: l'un exploité par le DG et l'autre est la BTS alimenté en énergie solaire avec le DG de secours [4].

Les résultats des simulations sont organisés en fonction du coût actuel net (Net Present Cost: NPC), l'électricité (Cost of Electricity: COE), le coût d'exploitation, l'excédent d'électricité, la charge électrique non satisfaite et la consommation de diesel. Les analyses des résultats sont également présentées après avoir donné tous les fichiers de sortie.

Pour la zone prototype, la demande moyenne de charge BTS est d'environ 1,4 ~ 1,5 KW, la demande la plus élevée est de 2.0 KW et plus et la demande la plus faible est de 0.9 ~1.0 KW. Les données mentionnées dans cette simulation exemplaire sont fournies par Grameenphone Ltd., le modèle de charge de la BTS est aléatoire. Après avoir modéliser avec HOMER la consommation de la charge a été trouvée 35 kWh/jour [4].

Deux durées différentes de délestage moyen par jour ont été considérées pour la simulation; pour chacune deux systèmes pris en compte: l'un avec le système existant qui fonctionne avec la production décentralisée pendant les périodes de délestage, l'autre avec le système solaire PV BATTERIE proposé, avec un DG de plus petite taille pour l'alimentation secondaire. Toutes les simulations ont été effectuées en utilisant HOMER pour obtenir le dimensionnement, le coût, les données électriques et d'émission optimisés des deux systèmes. Le prix, l'efficacité, la durée de vie de tous les éléments sont présentés dans le tableau III. I.

Element	Initial Cost	Replacement Cost	Efficiency (%)	Lifetime (Years)
SPV	6500 (\$/KW)	5000 (\$/KW)	13	20
Battery	300 (Per Unit)	300 (Per Unit)	80	Depends on Usage
Converter	600 (\$/KW)	450 (\$/KW)	80	20
Generator	350 (\$/KW)	250.9 (\$/KW)	85	Depends on Usage

**Tableau III.1.** Informations sur les éléments.

Les résultats de la simulation et la comparaison entre système traditionnel et le système proposé sont présentés pour différentes durées de délestage sont présentés dans le tableau III.2. Dans la figure III.3 les valeurs optimisées des composants et dans les figures (III.4 et III.5), où la production mensuelle d'électricité sont présentées. Dans le tableau III.3, les comparaisons entre les données d'émission des deux systèmes sont présentées.

Sensitivity Results		Optimization Results										
Sensitivity variables												
PV Capital Multiplier	2.5	GEN-1 Capital Multiplier	4									
B460 Capital Multiplier	16	Conv. Capital Multiplier										
Double click on a system below for simulation results.												
	PV (kW)	GEN-1 (kW)	B460 (kW)	Conv. (kW)	Efficiency Measur.	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kW...)	Ren. Frac.	Diesel (L)
	2.5	4	16	4	No	3000	\$ 132,625	10,800	\$ 270,682	1.657	0.27	1,782
		4	16	4	No	3000	\$ 92,000	16,360	\$ 301,140	1.844	0.00	1,838
	3.5	4		4	No	3000	\$ 72,075	64,659.0...	\$ 826,631...	506...	0.38	1,099
		4		4	No	3000	\$ 15,200	141,712...	\$ 1,811,58...	110...	0.00	1,099

Figure. III.3. Valeurs optimisées pour les composants.

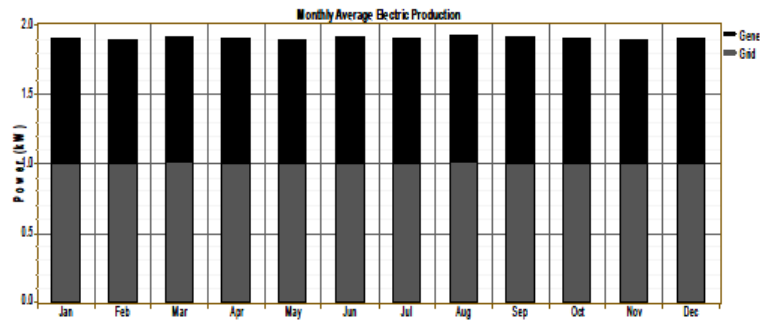


Figure. III.4. Production d'électricité (système traditionnel).

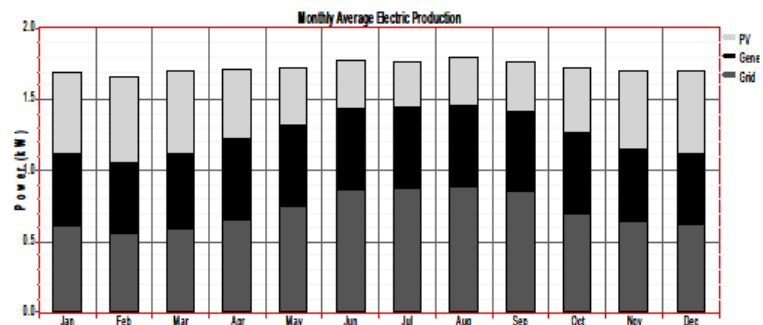


Figure. III.5. Production d'électricité (système proposé).

Load-Shedding Hours	NPC (\$)	COE (\$/KWh)	Operating Cost (\$/yr)	Excess Electricity (KWh/yr)	Unmet Load (KWh/yr)	Diesel Used (L)	Load-Shedding Hours	NPC (\$)	COE (\$/KWh)	Operating Cost (\$/yr)	Excess Electricity (KWh/yr)	Unmet Load (KWh/yr)	Diesel Used (L)
11	645264	3.951	39777	2433	.000220	7238	11	265942	1.628	10429	53.8	.000106	1736
12	687519	4.210	43081	2897	.000209	7895	12	270682	1.657	10800	53.8	.000106	1782

Tableau III.2. Comparaison des coûts entre les deux systèmes: (a) Traditionnel (b) Proposé.

Load-Shedding Hours	Carbon Di-oxide (Kg/yr)	Carbon Mono-oxide (Kg/yr)	Unburned Hydrocarbon (Kg/yr)	Particulate Matter (Kg/yr)	Sulfur Di-oxide (Kg/yr)	Nitrogen Oxide (Kg/yr)	Load-Shedding Hours	Carbon Di-oxide (Kg/yr)	Carbon Mono-oxide (Kg/yr)	Unburned Hydrocarbon (Kg/yr)	Particulate Matter (Kg/yr)	Sulfur Di-oxide (Kg/yr)	Nitrogen Oxide (Kg/yr)
11	24051	89.6	83.2	42.9	60	436	11	9050	44.2	65.3	33	27.1	111
12	25492	92.1	77.6	41.2	62.4	474	12	9066	43.7	63.9	32.2	26.9	113

**Tableau III.3.** Comparaison des données d'émission entre les deux systèmes: (a) Traditionnel (b) Proposé.

Dans cette zone éloignée, la BTS fonctionne pour différents opérateurs mobiles, ce qui nécessite une énorme quantité de d'énergie pour leur fonctionnement. Mais les sites comme les régions éloignées qui n'a pas encore acquis la capacité de générer une quantité suffisante d'électricité. Donc, les opérateurs mobiles doivent faire face à de nombreuses difficultés à cause de ce manque de production d'électricité. Dans cette simulation exemplaire, on s'est concentré sur l'alimentation des sites BTS en réseau avec un système solaire PV, ce qui peut réduire considérablement les problèmes que rencontrent les opérateurs de télécoms.

**III.5. Logiciel PVSyst**

PVSyst est un outil de simulation centré sur le photovoltaïque (PV), développé à l'origine à l'Université de Genève. développé à l'Université de Genève mais qui est maintenant une société indépendante. Le progiciel se concentre sur modélisation, le dimensionnement, la simulation et l'analyse des systèmes PV [7]. PVSyst dispose d'une sorte de modélisation



**Figure. III.7.** Origine de développement de PVSyst

Financière, mais il s'agit principalement d'un outil de performance [8]. Une simulation typique dans PVSyst se compose des étapes suivantes [7]:

- 1) Définition du projet. C'est ici que l'utilisateur crée le projet souhaité dans l'interface utilisateur, qui aussi sélectionne l'emplacement géographique et le fichier météo à utiliser. Un certain nombre de sites et de fichiers météo sont déjà inclus dans les bases de données PVSyst, mais l'utilisateur a également la possibilité d'importer ses propres fichiers. PVSyst supporte plusieurs types de fichiers météo tels que TMY2, TMY3 et EPW, ainsi que des fichiers provenant de sources telles que Meteonorm, Photoplan, etc., PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), le World Radiation Data Centre (WRDC), Retscreen, Helioclim et SolarGIS.
- 2) Créer une variante du système. C'est ici que l'utilisateur crée une version de calcul du projet créé à l'étape 1. Sur l'interface, l'utilisateur peut définir différents paramètres d'entrée tels que l'orientation du module, la configuration du système et les paramètres de perte.
- 3) Exécution de la simulation. L'utilisateur exécute la simulation et génère une variété de graphiques et de rapports pour l'analyse du système PV. l'analyse du système PV. PVSyst permet à l'utilisateur d'analyser les résultats dans le programme, de les exporter vers un autre programme ou de sauvegarder la variante pour un usage ultérieur.

PVSyst offre à l'utilisateur des rapports et des ventilations détaillés et de précieuses informations sur les aspects techniques de la conception et du déploiement. Cela permet à PVSyst de répondre aux besoins d'un large éventail d'utilisateurs, y compris les chercheurs et les architectes. De plus, son interface est également multilingue et disponible dans d'autres langues [8].

Après l'avoir installé, les utilisateurs peuvent utiliser PVSyst gratuitement en mode d'évaluation pendant 30 jours durant lesquels il fonctionne à pleine capacité. Pour profiter de toutes les capacités par la suite, l'utilisateur devra acheter une licence, sinon PVSyst passera automatiquement en mode démo dans lequel il fonctionne avec des capacités limitées.

PVSyst soutient également les universitaires en leur accordant des remises sur les licences achetées à des fins éducatives. Ces remises sont disponibles pour les écoles, les universités et les autres instituts d'enseignement sur demande directe auprès de PVSyst.

PVSyst est aussi doté d'une interface utilisateur graphique qui permet aux utilisateurs non pas expérimentés en modélisation informatique de construire leurs propres systèmes PV, d'effectuer des simulations de base, et de naviguer dans le logiciel avec une relative facilité. L'interface de PVSyst permet à l'utilisateur d'effectuer la conception et le dimensionnement de systèmes et d'obtenir des résultats sous forme de graphiques ou de tableaux, de concevoir et de dimensionner un système et d'obtenir facilement des résultats sous forme graphique ou tabulaire. Pour la plupart des tâches, l'utilisateur n'a qu'à saisir certaines valeurs requises dans les champs appropriés puis d'exécuter des actions en appuyant sur un bouton.

PVSyst documente les résultats de simulation dans des rapports, résumant les paramètres de simulation, les principaux résultats et la qualité du système. Les résultats peuvent également être visualisés sous forme de tableaux ou exportés vers un logiciel tiers tel que Microsoft Excel pour une analyse ou une présentation plus approfondie.

### III.6. Flexibilité de la modélisation de PVSystem

PVSyst est livré sous forme d'une application de bureau complète et ne permet pas l'utilisation de scripts. Cela signifie que l'utilisateur peut uniquement modéliser un système PV dont la conception adhère à certaines normes prédéfinies dans PVSyst. Il n'est donc pas possible pour l'utilisateur d'introduire ou de modifier l'un des modèles thermiques, électriques ou optiques de PVSyst [9].

Les utilisateurs peuvent cependant définir des dispositifs qui ne se trouvent pas dans les bases de données de composants PVSyst en utilisant les fiches techniques des fabricants, créant ainsi de nouveaux dispositifs dans la base de données.

### III.7. Capacité de modélisation économique et de performance de PVSyst

PVSyst ne traite que du photovoltaïque (PV) et divise ses modèles de performance en quatre catégories:

- 1) Connecté au réseau: il s'agit d'un type de système qui est composé d'éléments constituant le champ photovoltaïque, c'est-à-dire des modules/chaînes de modules, onduleurs et tout ce qui va jusqu'à la connexion au réseau.
- 2) Autonome: un système qui doit être constitué de modules, d'une batterie et d'un régulateur.
- 3) Un système de pompage de l'eau.

- 4) Réseau DC: un système composé d'une matrice PV et d'un profil de charge destiné au réseau de transport public.

PVSyst propose également une évaluation économique pour modéliser les coûts et les investissements des projets. Avec le modèle financier, l'utilisateur peut projeter les coûts de fonctionnement et déduire la rentabilité à long terme, en particulier pour les systèmes connectés au réseau [8].

### III.8. Premier contact avec PVsyst

En ouvrant PVsyst (Version 6.04), vous arrivez sur la page principale [10]:

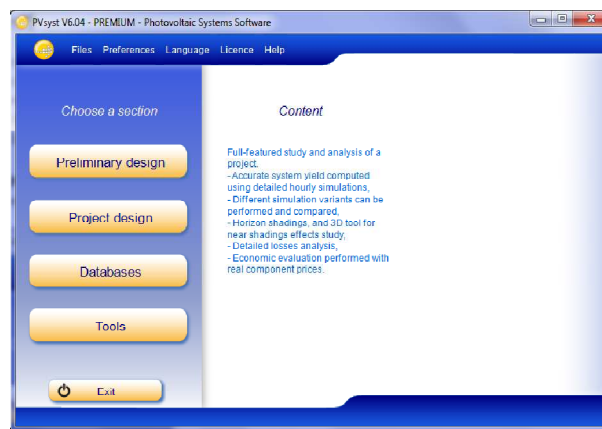


Figure. III.8. Page principale lors du premier contact avec PVsyst [10].

Cela donne accès aux quatre parties principales du programme: 'conception préliminaire', 'conception du projet', 'bases de données' et 'outils'.

"Conception préliminaire" ne doit pas être utilisé pour un projet connecté au réseau, mais plutôt de commencer la "Conception du projet" complète (Fig. III.8).

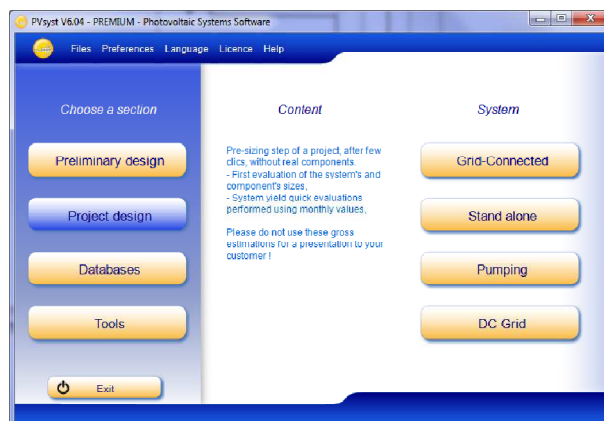


Figure. III.9. Conception préliminaire sur PVsyst [10].



Lorsque le projet 'connecté au réseau' est choisi, le tableau de bord suivant pour la gestion d'un projet sera obtenu (Fig. III.10).

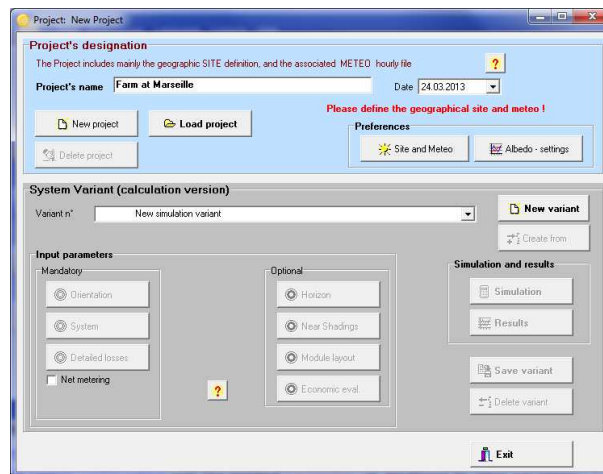


Figure. III.10. Tableau de bord pour gérer un projet dans PVsyst [10].

### III.9. Étapes du développement d'un projet

Lorsqu'on développe un projet dans PVsyst, il est conseillé de procéder par petites étapes :

- Créer un projet en spécifiant l'emplacement géographique et les données météorologiques.
- Définir une variante de base de l'installation, en indiquant l'orientation des modules PV, la puissance requise ou la surface disponible et le type de modules PV et d'onduleurs que vous souhaitez utiliser. PVsyst proposera une configuration de base pour ce choix et définira des valeurs par défaut raisonnables pour tous les paramètres nécessaires à un premier calcul. On peut ensuite simuler cette variante et la sauvegarder. Il s'agira d'une première approximation qui sera affinée lors d'itérations successives.
- Définir des variantes successives en ajoutant progressivement des perturbations à ce premier système, par exemple des ombres lointaines, des ombres proches, des paramètres de perte spécifiques, une évaluation économique, etc. Vous devez simuler et enregistrer chaque variante afin de pouvoir les comparer et comprendre l'impact de tous les détails que vous ajoutez à la simulation [10].

### III.10. References

- [1]. S. Sinha and S. Chandel, "Review of software tools for hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 192-205, 2014. Available: 10.1016/j.rser.2014.01.035.
- [2]. "Welcome to HOMER", *Homerenergy.com*, 2020. Available: <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/latest/index.html>. [Accessed: 08-Jul- 2020]
- [3]. S. T. Leholo, *Optimisation of hybrid micro-grid system for lte base station*, (Thèse soutenue à l'université de technologie de DURBAN), 2020.
- [4]. Moury, Sanjida, M. Nazim Khandoker, and Syed Mustansir Haider. "Feasibility study of solar PV arrays in grid connected cellular BTS sites." *2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*. IEEE, 2012.
- [5]. Home page of HOMER, <http://www.nrel.gov/homer/>.
- [6]. Dmowski, P. Biczal, and B. Kras, "Stand-alone telecom power system supplied by PEM fuel cells and renewable sources," *International FuelCell workshop*, Kofu, Japan, 2001.
- [7]. Gurupira, Tafadzwa, and Arnold Rix. "Pv simulation software comparisons: Pvsyst, nrel sam and pvlib." *Conf.: SAUPEC*. 2017
- [8]. PVSyst, "PVSyst Software." [Online]. Available: <http://www.pvsyst.com/en/software>.
- [9]. Z. Ren, S. Jacques, S. Bissey, N. Batut, A. Schellmanns, and A. Caldeira, "PVLab: an innovative and flexible simulation tool to better size photovoltaic units," *Renewable Energies and Power Quality Journal*, vol. 1, no. 12, 2014. [Online]. Available: <http://www.icrepq.com/icrepqfn%g2714/241.14-Ren.pdf>.
- [10]. Mermoud, André, and Bruno Wittmer. "PVSYST user's manual." *Switzerland, January* (2014).

# *Chapitre IV*

**Evaluation de Production d'Energie  
des Systèmes Injectés aux Réseaux  
Electriques, et Auto-Tracking de  
Consommation d'Energie des BTS**

### **IV.1. Introduction**

Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont un secteur important où la société des êtres humains dans son ensemble connaît une transformation, catalysée par elles. Les TIC sont un secteur potentiel à fort impact dans la compétition mondiale avec la consommation d'énergie et le changement des émissions de CO<sub>2</sub> et du climat mondial. Le secteur des TIC peut être subdivisé en plusieurs catégories Technologies de l'information, technologie des télécommunications et technologies des réseaux. Ce secteur consomme de l'énergie dans une proportion qui varie entre 3% de la consommation totale d'énergie dans le monde. D'autre part, le secteur des TIC émet 2 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>. Les deux taux de croissance continuent d'augmenter à l'avenir, ce qui a un impact important sur la demande d'énergie, le réchauffement de la planète et l'environnement [1,2]

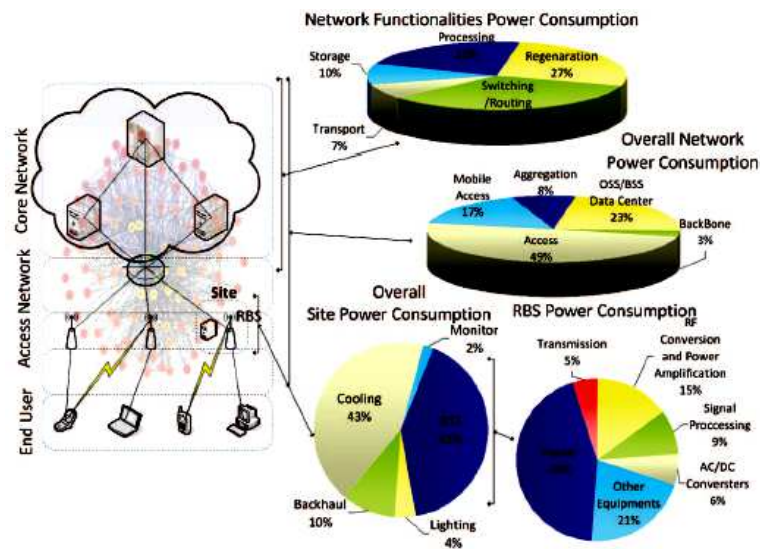
Les entreprises de télécommunications dans les zones rurales utilisent des systèmes d'énergie à base de diesel pour fournir de l'énergie à la section émetteur-récepteur de la BTS en raison du manque de fiabilité du réseau électrique. L'utilisation de l'approvisionnement en carburant à base de diesel est une affaire plus coûteuse car le prix du diesel augmente de façon exorbitante en raison de sa forte demande dans les secteurs industriels et domestiques, et dans les transports publics. De plus, les préoccupations concernant l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre et de la pollution ont poussé les entreprises de télécommunications à se concentrer sur d'autres options d'énergie renouvelable. à se concentrer sur d'autres options d'énergie renouvelable [3].

### **IV.2. Consommation d'énergie dans les couches des réseaux télécoms**

Dans la dernière partie de la figure IV.1, la puissance dans l'ensemble du site et dans la station de base BTS elle-même est présentée. La technologie multiporteurs peut offrir une efficacité énergétique en diminuant la puissance requise par utilisateur. Les stations de base distribuées peuvent partager les unités de bande de base entre différentes unités radioélectriques ou antennes montées sur tour, ce qui permet de réduire au minimum les coûts. unités distantes ou des antennes montées sur des tours, ce qui réduit les équipements de refroidissement et les pertes de transmission par câbles. La localisation intelligente des sites peut également entraîner une diminution de la consommation d'énergie puisque l'emplacement et le nombre de BTS requis sont fortement corrélés à la consommation d'énergie du réseau [4].

## Chapitre IV Evaluation de Production d'Énergie des Systèmes Injectés aux Réseaux Electriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Énergie des BTS

Les principales fonctionnalités d'un réseau peuvent être résumées comme étant le processus de régénération, transport, stockage, routage, commutation et traitement des données. Ainsi, la plus grande partie de l'énergie est consommée au routage/commutation, à la régénération et en traitement des données. Les protocoles de communication et les dispositifs électroniques sont responsables de cette consommation, et ceci impose des défis pour des techniques de transport plus sophistiquées, l'élimination thermique des commutateurs ou des serveurs et des transferts de données moins redondants [5].



**Figure.IV.1.** Consommation d'énergie dans les différentes couches du réseau [4].

En ce qui concerne la performance globale du réseau, la consommation d'énergie est plus élevée au niveau de la partie accès du réseau. et l'exploitation des centres de données qui fournissent calculs, le stockage, les applications et le transfert de données dans un réseau. D'un autre côté, les réseaux de base et d'agrégation présentent des demandes énergétiques plus faibles [5].

### IV.3. Efficacité énergétique dans les réseaux de télécommunications

Faire fonctionner un réseau de manière écologique est une tâche complexe. Parfois, optimiser la consommation d'énergie dans une partie du réseau peut augmenter la consommation d'énergie et dégrader les performances d'une autre partie du réseau. L'optimisation totale du réseau est meilleure que la somme des optimisations des parties individuelles. Un réseau fonctionnant économiquement en énergie n'est pas une question de protection de l'environnement seulement, mais aussi un facteur crucial pour le déploiement des futurs réseaux dans des zones éloignées dépendant de sources d'énergie

## **Chapitre IV Evaluation de Production d'Energie des Systèmes Injectés aux Réseaux Electriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Energie des BTS**

---

renouvelables ou de réseaux et de capteurs qui dépendent de l'alimentation par batterie. La minimisation de la consommation d'énergie a également un effet important sur le coût de fonctionnement d'un réseau, ce qui le rend plus plus abordable pour l'utilisateur. L'efficacité énergétique des réseaux peut être considérée comme une tâche très complexe puisqu'il n'existe pas de solution claire à ce problème. Il y a toujours un compromis entre la qualité de service, la couverture, les questions de capacité et la consommation d'énergie [4].

D'autre part, le réseau télécoms sans fil peut être divisé en trois sous-sections principales : les réseaux de base qui fonctionnent comme système de commutation, une interface avec le réseau fixe et système de facturation qui fonctionne comme un système de commutation, une interface avec le réseau fixe et un système de facturation. La BTS établit l'interface radiofréquence entre le réseau et la station mobile. station mobile, alors que la station mobile est utilisée par l'abonné pour effectuer un appel téléphonique et un appel de données [6].

La diminution de la consommation d'énergie des BTS constitue l'un des aspects essentiels de la technologie des télécoms pour créer l'administration des systèmes de communication sans fil afin d'obtenir une valeur morale des ressources financières et de mettre en œuvre une action de développement environnementale [7].

### **IV.4. Comptabilité des BTS**

La comptabilité active des BTS (figure IV.2) dans de multiples contextes techniques est un axe de recherche majeur, englobant [8] la/1':

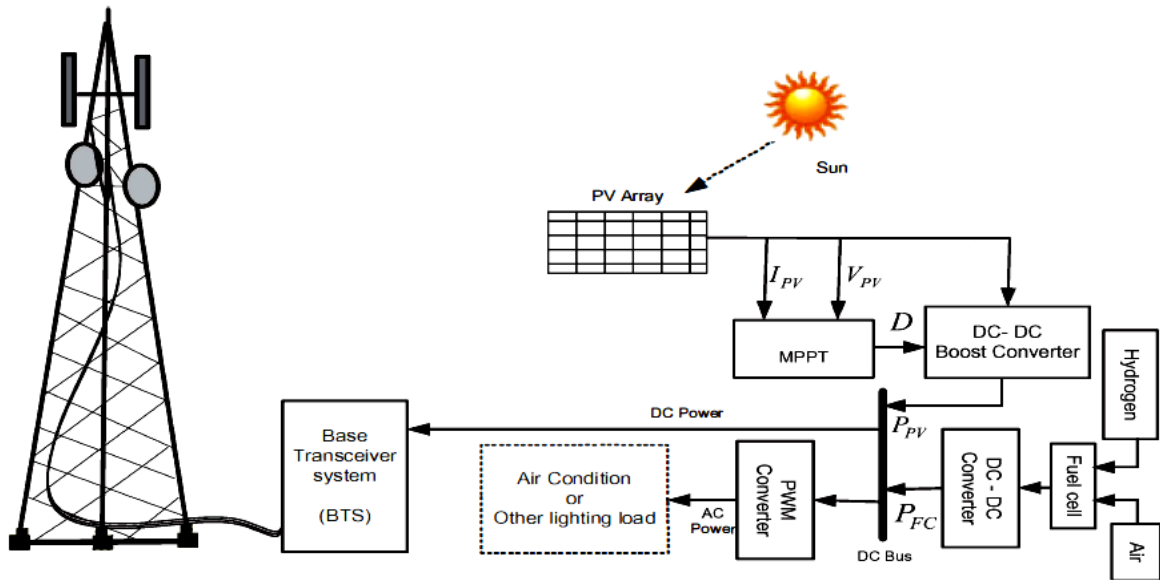
1. Vérification des sources d'énergie des systèmes de communication, y compris par des données de mesure spéciales
2. Analyse des mesures d'économie d'énergie et de performance
3. Évaluation et création de traitements et de solutions technologiques

Solutions technologiques basées sur la génération, par l'utilisation de cellules solaires sur les infrastructures elles-mêmes, d'une partie de l'électricité nécessaire aux équipements de radio équipements de télécommunication

- Analyse des applications potentielles des sources d'énergie renouvelables des systèmes énergétiques de télécommunications hors réseau

## Chapitre IV Evaluation de Production d'Énergie des Systèmes Injectés aux Réseaux Électriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Énergie des BTS

- Analyse des avantages environnementaux et sociaux de l'application d'une technologie de source alternative qui répond aux exigences des pertinentes des puissantes installations de radiodiffusion.



**Figure. IV.2.**Diagramme schématique l'alimentation d'une BTS sur le site de télécommunication par PV et Pile à combustible assistée [9].

Le réseau sans fil se compose des éléments principaux: réseau central, station de base et station mobile, où la consommation maximale d'énergie dans un réseau de communication sans fil est déterminée par ces trois composants de base. La consommation électrique des composants du réseau central est faible, de sorte qu'un seul composant du réseau central peut consommer une puissance d'environ 10 KW. Le réseau de communication mobile se compose de quelques nœuds principaux comme la station mobile, la station émettrice-réceptrice de base et le centre de commutation mobile, qui est responsable d'une plus grande consommation d'énergie que les autres.

La BTS est le composant de base du réseau de communication sans fil, et est responsable de la consommation d'énergie maximale de l'ensemble du réseau [10]. La consommation typique en énergie d'une BTS est donnée au tableau IV.1.

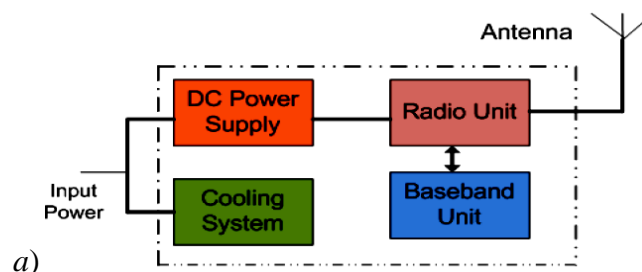
## Chapitre IV Evaluation de Production d'Energie des Systèmes Injectés aux Réseaux Electriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Energie des BTS

Power consumption for GSM macro BTS		
Configuration type	6/6/6	2/2/2
Baseband accessory	300 W	200 W
TRX 40W power amplifier with eff. 35%	2200 W	700 W
<b>BTS consumption</b>	<b>2500 W</b>	<b>900 W</b>
Other accessory	100 W	100 W
AC-DC power conversion	370W	130W
<b>Power consumption at site</b>	<b>3000 W</b>	<b>1130W</b>
Cooling system ,consumption around 30%	700 W	300 W
<b>Power consumption with cooling system</b>	<b>3700W</b>	<b>1430W</b>
Cavity combiner insertion losses .2 dB (5%)		
Cable feeder losses with 50 m length (3 dB)		
RF feed per carrier signal	27 W/14.3dBW	27 W/14.3dBW
ERP per carrier signal with 18dBi antenna gain	32dBW	32dBW

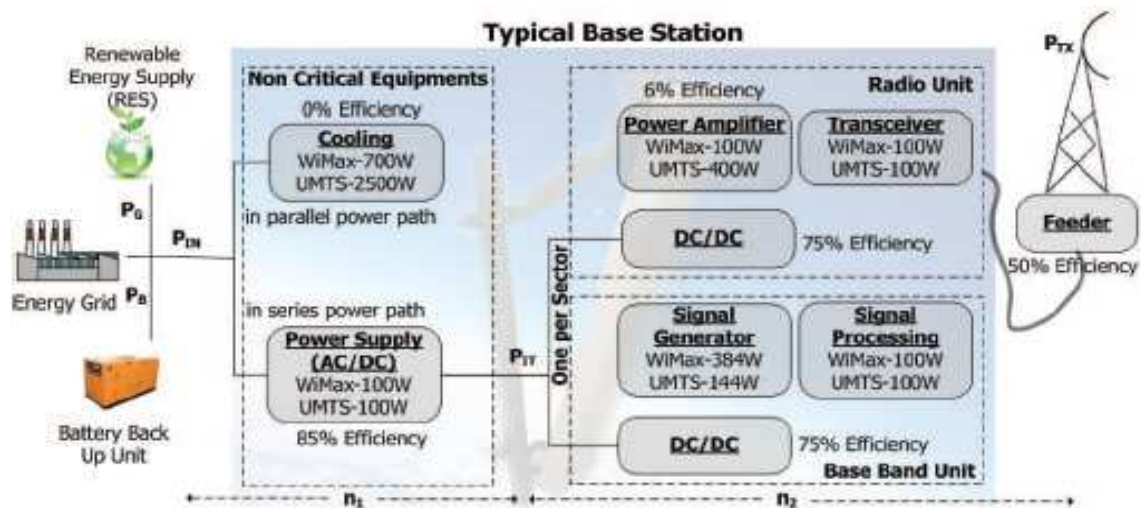
**Tableau IV.1** : exemple de consommation électrique pour la zone des sites BTS 6/6/6 et 2/2/2 [11].

### IV.5. Consommation électrique due à la BTS

BTS est l'élément le plus gourmand en énergie du réseau cellulaire. Elle consomme plus de plus de 90 % de la puissance totale du réseau. La consommation d'énergie de la BTS dépend du type de station de base, comme la macro-station de base, la micro-station de base, la Pico-station de base et dépend de la sectorisation de la station de base. Il peut s'agir d'un modèle de cellule à un, deux ou trois secteurs. Normalement, la consommation d'énergie d'une station de base macro est plus élevée que celle d'une station de base micro et Pico.







**Figure. IV.3.a)** Schéma fonctionnel d'une BTS [11]; **b)** Structure d'une station de base cellulaire typique [4].

#### IV.6. Alimentation DC

La fonction de base de l'alimentation est de produire de l'énergie pour tout l'équipement des émetteurs-récepteurs de la BTS (figure IV.3). À partir d'une entrée AC une tension DC est produite comme alimentation. Le réglage de l'alimentation DC permet de fournir une alimentation DC appropriée à l'équipement radio et à l'unité de bande de base dans l'armoire de la station de base. La taille et la capacité du redresseur DC dépendent de la taille de l'armoire de la station de base : petit système, système moyen et grand système. Environ 11 % de l'énergie est consommée par l'alimentation en courant continu dans l'armoire de la station de base. Un exemple de spécification de l'alimentation en courant continu de l'armoire de la station de base est donné dans la spécification électrique suivante de l'alimentation en DC [12].

#### IV.7. Consommation d'énergie dans une station de télécoms

##### IV.7.1. Système de refroidissement

De nos jours, le secteur du sans fil demande comment réduire l'énergie dans une zone de température distincte dans un boîtier électronique, prolonger la durée de vie et confirmer que chaque composant d'un boîtier ou d'une armoire électronique doit fonctionner à un niveau de performance élevé. La consommation d'énergie de la station de base est beaucoup plus importante que celle de tout autre établissement public (bâtiments) en raison de la grande quantité de chaleur générée par les composants de

## **Chapitre IV Evaluation de Production d'Energie des Systèmes Injectés aux Réseaux Electriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Energie des BTS**

---

télécommunications et des exigences environnementales pour leur bon fonctionnement. Environ 25 % de l'énergie consommée est due à l'anneau de climatisation ou au système de refroidissement sur l'ensemble de la consommation d'énergie de la station de base. Un grand nombre de BTS sont installées dans le monde entier dans le cadre du réseau de télécommunication. Le système de refroidissement ou de conditionnement d'air augmente la consommation d'énergie du réseau sans fil. C'est pourquoi les économies d'énergie fait l'objet d'une attention accrue [13].

La station de base radio utilisée dans les systèmes de télécommunication mobile est responsable de la production d'une quantité de chaleur qui doit être éliminée. produire une quantité de chaleur qui doit être évacuée. Une armoire typique de station de base peut produire une quantité de chaleur d'environ 1600-2500W. Environ 80% de la quantité de ce rayonnement thermique est produite dans l'équipement d'émission radio. Normalement, les systèmes de refroidissement des stations de base sont conçus pour répondre pleinement aux exigences des climats intérieurs. par les climats intérieurs, qui observés à la température de la station de base [14].

### **IV.7.2. Climatisation**

Pour une station de base ou une armoire de station de base, c'est un problème important à résoudre que la chaleur interne générée et rayonnée. La température extérieure ou les conditions météorologiques de la station de base de la station de base et la petite taille des abris peuvent entraîner une augmentation de la température intérieure. En fait, les systèmes de climatisation sont conçus pour maintenir la température interne de l'armoire entre 25°C à +30°C et afin de protéger les composants électriques des dommages causés par l'augmentation de la température. l'augmentation de la température.

### **IV.7.3. Echangeur de chaleur ou système de refroidissement libre**

Une station de base normale qui a été placée le long de la rue, avec un mât, accumulera une énorme quantité de charge thermique à partir de ses composants. La consommation moyenne d'énergie pour refroidir l'armoire ou l'abri peut atteindre 26280 KWh/an. Si de l'air extérieur filtré est utilisé pour refroidir l'armoire, la consommation d'énergie est beaucoup plus faible.

#### **IV.7.4. Technologie de refroidissement par ventilation**

Cette technologie a été développée afin de formuler la pleine utilisation de l'air frais de refroidissement extérieur, où la chaleur interne générée à l'intérieur de l'armoire est directement évacuée par le refroidissement extérieur, et la consommation d'énergie de l'air climatisé est relativement faible. Cela signifie que le temps de fonctionnement de l'air conditionné peut être moindre.

#### **IV.7.5. Consommation d'énergie due à l'unité radio**

L'unité radiofréquences (RF) est constituée d'amplificateurs de puissance, d'émetteurs-récepteurs et d'un ventilateur de refroidissement. Ce composant convertit le signal numérique en signal radiofréquence, et est directement connecté à l'antenne par un câble coaxial. L'unité radio consomme plus de 60% de l'énergie de l'armoire de la station de base.

#### **IV.7.6. Consommation d'énergie due aux pertes de chemin de propagation**

Les pertes de propagation concernent l'atténuation de la communication entre l'extrémité d'émission et l'extrémité de réception, et sont causées par l'expansion naturelle du signal RF de l'espace libre avant qui prend la forme d'une sphère croissante, les pertes par absorption. Normalement, lorsque le signal RF traverse les différents types de médias, il provoque la réflexion, la diffraction, Il en résulte que l'intensité du signal reçu peut être augmentée ou diminuée. être augmentée ou diminuée.

#### **IV.8. Systèmes hybrides**

Les stations BTS sont des infrastructures de télécoms qui facilitent la communication sans fil entre le dispositif d'abonné et les réseaux des opérateurs de télécoms [15]. La nature intermittente des énergies solaire et éolienne dans des conditions climatiques variables exige une évaluation de la faisabilité et un dimensionnement optimal du système hybride d'énergie solaire et éolienne, tel que faute d'étude de faisabilité technique et financière appropriée, les systèmes d'énergie alternative hybrides risquent d'être peu efficaces [16].

## **Chapitre IV Evaluation de Production d'Energie des Systèmes Injectés aux Réseaux Electriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Energie des BTS**

---

On vise ici à concevoir, d'optimiser et d'analyser un système d'alimentation hybride efficace pour une station de télécoms éloignée et de le comparer au système d'alimentation diesel existant. et de le comparer avec le système d'alimentation diesel existant.

HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewable), utilisé pour prédire la consommation en énergie de la BTS, détermine la stratégie opérationnelle d'un système hybride d'énergie renouvelable en se basant sur la simulation, l'analyse d'optimisation et l'analyse de sensibilité. Il simule le fonctionnement du système sur la base des composants choisis par l'utilisateur. Ainsi, ici les combinaisons hybrides choisies sont: [16]

- I. générateur diesel
- II. générateur diesel-réseau
- III. générateur solaire PV-diesel
- IV. système solaire PV-éolien-générateur diesel-batterie
- V. système solaire PV-éolien-générateur diesel-batterie-pile à combustible
- VI. système solaire PV-éolien-batterie-pile à combustible
- VII. système solaire PV-éolien-batterie.

De plus, HOMER simule le système en se basant sur l'estimation du coût d'installation, du coût de remplacement, du coût d'exploitation, du carburant et des intérêts. La liste des différentes configurations d'énergie renouvelable hybride sera classée du coût total actuel net (TNPC) le plus bas au plus élevé. Elle détermine ensuite la meilleure configuration de système réalisable qui peut répondre adéquatement à la demande d'électricité. Les solutions optimales se rapportant au TNPC le plus bas [16].

HOMER compare un large éventail d'équipements avec des contraintes et des sensibilités différentes pour optimiser la conception du système. L'analyse est basée sur les propriétés techniques du système et sur le coût du cycle de vie (LCC) du système. Le LCC comprend le coût d'investissement initial, le coût d'installation et les coûts d'exploitation pendant la durée de vie du système. HOMER effectue des simulations pour satisfaire la demande donnée en fonction des différentes options technologiques et de la disponibilité des ressources.

### **IV.9. Modélisation du système hybride**

Le logiciel HOMER nous a aidé à déterminer comment les différents systèmes renouvelables et hybrides interagissent avec la demande de l'utilisateur final. Sur la base de

la disponibilité et du potentiel des énergies renouvelables dans la région éloignée, un système énergétique hybride est modélisé.

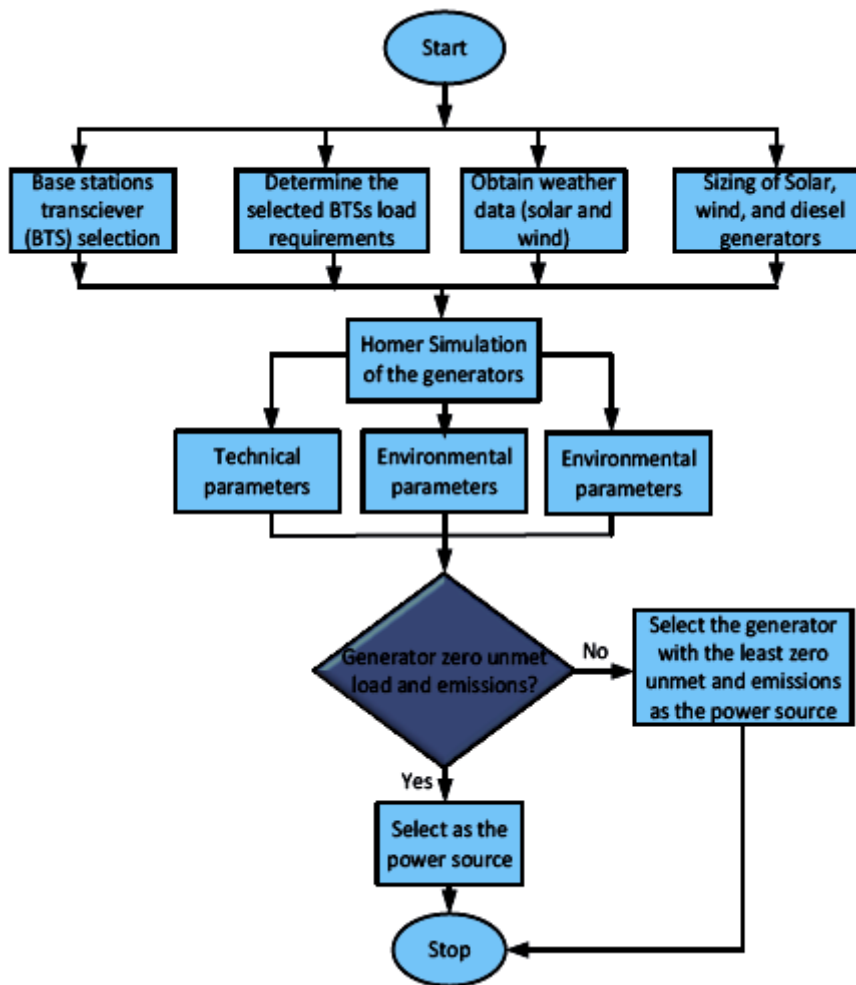
### **IV.10. Charge BTS**

La charge des télécoms (BTS) est considérée comme une charge primaire. La BTS est une infrastructure de télécommunications utilisée pour faciliter la communication sans fil entre le dispositif de l'abonné et le réseau de l'opérateur de télécommunications. Le développement mondial des BTS se fait de plus en plus dans des régions éloignées où le réseau de distribution d'électricité tombe souvent en panne pendant de longues périodes ou dans lesquelles il n'y a pas d'accès au réseau de distribution d'électricité. Ainsi, les BTS dans de telles régions, des générateurs diesel avec des batteries sont des générateurs diesel avec des batteries sont utilisés pour secourir le réseau d'approvisionnement en électricité et assurer la disponibilité du réseau. disponibilité du réseau. Mais ceux-ci nécessitent un niveau élevé de maintenance et consomment des quantités relativement élevées de carburant diesel pour de faibles de faible niveau. Par conséquent, les générateurs diesel entraînent des frais d'exploitation élevés. élevés. L'augmentation du coût de l'énergie (COE) due à l'augmentation du prix du diesel et les préoccupations relatives à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre ont entraîné une augmentation du coût de l'énergie. l'augmentation du prix du diesel et les inquiétudes liées à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre ont les entreprises de télécommunications à se concentrer sur de meilleures méthodes de gestion de l'énergie [16].

### **IV.11. Efficacité énergétique d'un système de tracking par Internet**

La demande d'énergie ne cesse de croître avec la croissance des réseaux de télécoms en raison de l'augmentation du nombre de BTS. La croissance de l'infrastructure de télécoms entraîne une augmentation proportionnelle de la demande d'énergie du secteur des télécoms. L'énergie sous forme d'électricité pour l'alimentation peut être obtenue à partir de diverses sources, telles que le réseau électrique, les générateurs diesel et les sources renouvelables [17].

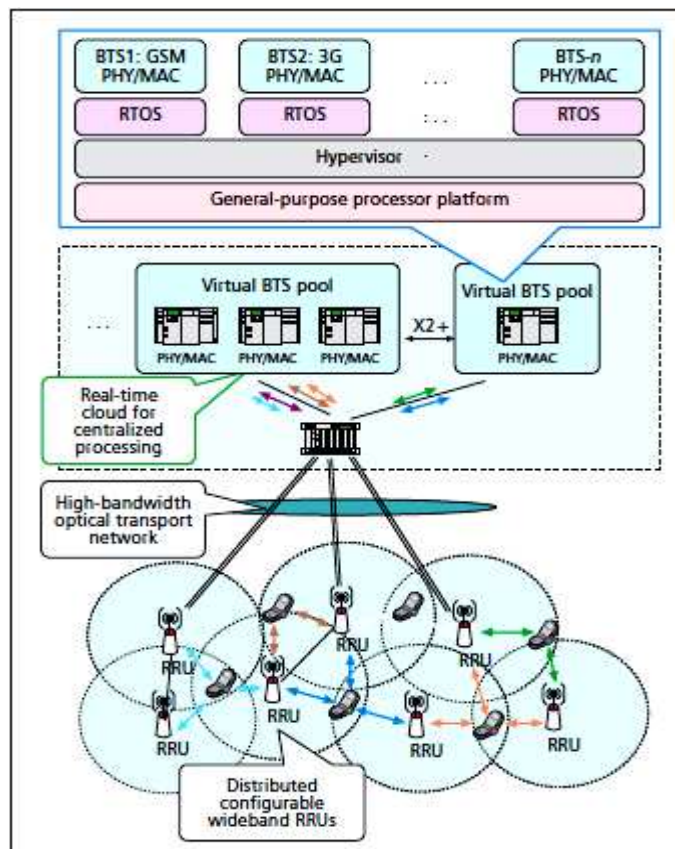
Les paramètres techniques, environnementaux et économiques ont été évalués et analysés pour déterminer la source d'énergie optimale. Les méthodes matérielles utilisées dans cette sont basées sur l'organigramme présenté à la figure IV.4.



**Figure. IV.4.**

Organigramme du système hybride optimisé par HOMER [17].

HOMER a simulé toute taille du système énergétique. Le dimensionnement d'un système de stockage d'énergie hybride a été présenté pour un micro-réseau basé sur le photovoltaïque (PV) à travers la technique de l'espace de conception. Une zone rurale éloignée peut avoir des ressources solaires abondantes mais des ressources éoliennes limitées et vice versa. Il est donc nécessaire de déterminer la solution d'énergie renouvelable appropriée pour chaque zone en fonction des ressources solaires et éoliennes disponibles [18]. Les divers types d'emplacement des BTS est donné à la figure IV. 5, avec l'environnement de chaque type et l'utilisation des BTS virtuelles.



**Figure. IV.5.** Stations BTS dans un réseau d'accès radio propre 'Clean-Radio Access' dont plusieurs opérateurs ont activement développé et déployer des technologies vertes, notamment des stations de base vertes alimentées uniquement par des renouvelables, et des infrastructures d'accès vertes [17].

#### IV. 12. Performance du système de production d'énergie photovoltaïque pour BTS

Pour produire et évaluer l'énergie pour BTS, les onduleurs PV conventionnels reliés au réseau souffrent d'une commutation difficile, d'un manque de capacité buck-boost, et d'un faible rendement : ce sont des inconvénients pouvant être surmontés par des topologies récentes qui éliminent davantage les courants de fuite et améliorent davantage le rendement [19]. En raison de leur coût, de leur taille et de leur poids inférieurs, les onduleurs PV actuels sont préférés dans les applications reliées au réseau, mais ils concourent à avoir un rendement plus élevé et à éliminer les courants de fuite [20, 21].

Ajoutés aux entrées des convertisseurs de puissance éleveurs Buck DC/DC ou aux sorties en tant que filtres côté charge, les diodes, les transistors et les condensateurs/inducteurs pour le stockage d'énergie, en tant que filtres côté alimentation, contribuent ici à réduire l'ondulation de la tension.

## Chapitre IV Evaluation de Production d'Energie des Systèmes Injectés aux Réseaux Electriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Energie des BTS

Bien que le système contienne un profil de charge représentant un BTS, des batteries pour stocker l'énergie excédentaire et améliorer la fiabilité du système, un DG pour l'alimentation de secours, et une éolienne comme GERS à côté des panneaux PV, ce dernier circuit connecté à un bus 48V DC est le plus important [22].

Lors de l'alimentation des BTS par modules PV, les besoins en convertisseurs de puissance Buck élévateurs DC/DC à découpage à faible puissance sont affectés par la demande de faible puissance et la nécessité d'un circuit de gestion de la puissance pour connecter une tension variable à une charge fixe à haute tension efficace [21].

Les irradiances totales sur les surfaces des panneaux solaires alimentant les BTS, composées de trois parties d'insolations, sont optimisées en considérant l'angle d'inclinaison de la surface en fonction des courses solaires diurnes et annuelles, comme suit

$$H_t(\beta, \delta) = H_{dir}(\beta, \delta) + H_{dif}(\beta, \delta) + H_{ref}(\beta, \delta) \quad (IV. 1)$$

Où  $H_t$ ,  $H_{dir}$ ,  $H_{dif}$ ,  $H_{ref}$ ,  $\beta$  et  $\delta$  sont respectivement les rayonnements totaux sur les surfaces inclinées, les rayonnements directs/diffusés/réfléchis et les angles d'inclinaison/azimut.

Si le générateur PV est supposé fonctionnant toujours en MPP modélisé; et les données de son module ont été tirées des fiches techniques des modules SolarWorld250SW 250Mono, le module PV traite, en fonction des radiations et des températures solaires, le courant et la tension, obtenus en omettant les densités de poussière.

La modélisation des caractéristiques I-V de sortie, pour les cellules du module PV, adoptée dans la littérature au cours des cinq dernières décennies [23-26], est un modèle basé sur un circuit équivalent principalement utilisé pour les technologies MPP : une modélisation de cellule PV à une diode qui contient une diode, un courant généré par la lumière, une résistance parallèle exprimant un courant de fuite et une résistance en série décrivant une résistance interne agissant contre le flux de courant. Son équation caractéristique I-V est:

$$I = I_{PH} - I_S \left[ \exp \left( \frac{q(V + IR_S)}{kT_C A} - 1 \right) - (V + IR_S) / R_{SH} \right], \quad (IV. 2)$$

avec  $I_{PH}$  le photocourant,  $I_S$  le courant de saturation de l'obscurité,  $q$  ( $1,6 \times 10^{-19}C$ ) la charge de l'électron,  $k$  la constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}J/K$ ),  $T_C$  la température de fonctionnement de la cellule,  $A$  le facteur d'idéalité,  $R_{SH}$  la résistance du trajet en dérivation, et  $R_S$  la résistance en série.

Dépendant de l'insolation et de la température de fonctionnement de la cellule,  $I_{PH}$  est égal à:



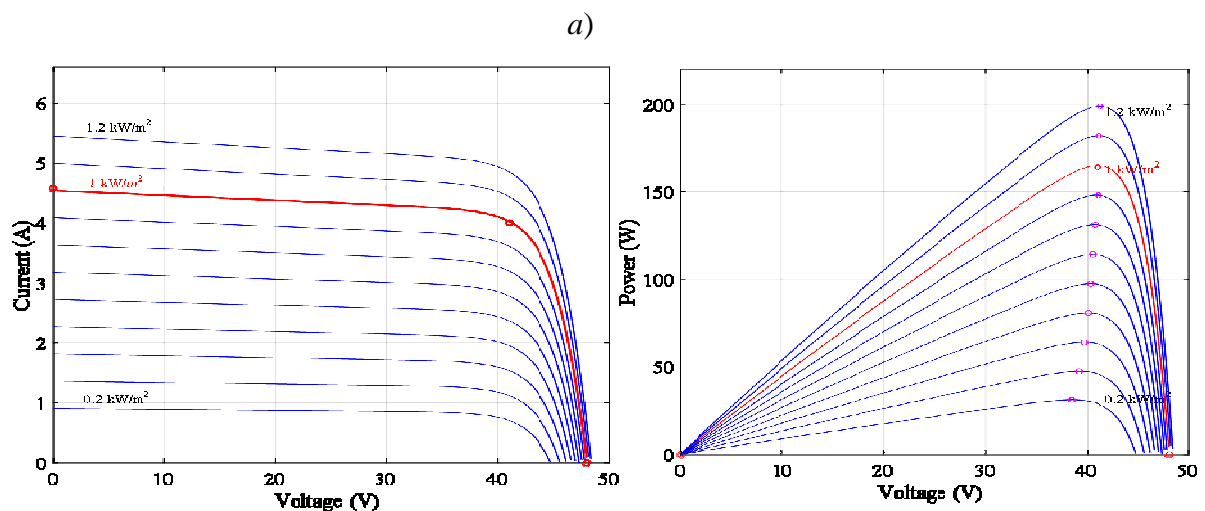
$$\left[ I_{SC} + K_I (T_C - T_{Ref}) \right] \lambda, \quad (IV. 3)$$

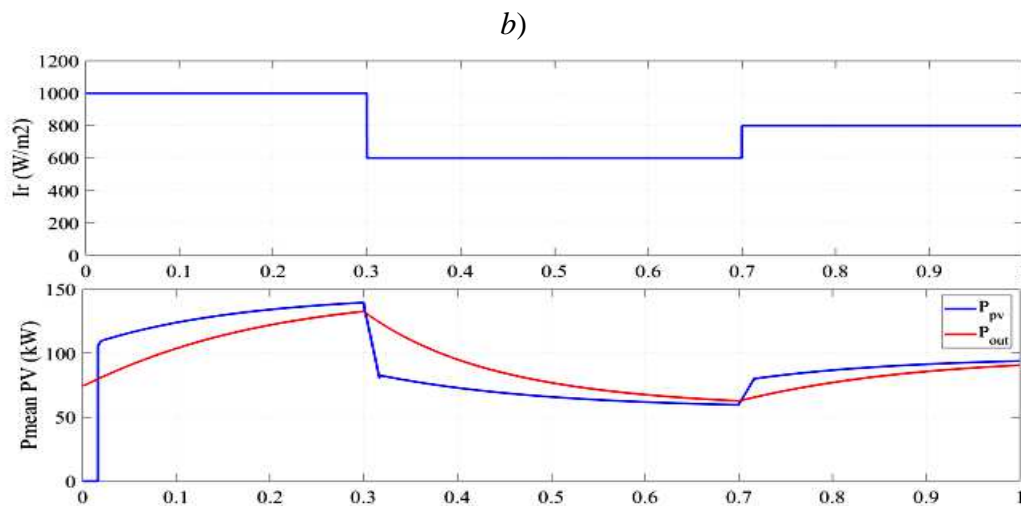
Où  $I_{SC}$ ,  $K_I$ ,  $T_{Ref}$  et  $\lambda$  ( $\text{kW/m}^2$ ) sont respectivement le courant de court-circuit de la cellule (à  $25^\circ\text{C}$  et  $1\text{kW/m}^2$ ), le coefficient de température de la cellule en condition de court-circuit, la température de référence de la cellule et l'ensoleillement.

$P_{MPP}$ (Puissance nominale de sortie)	164 W
$V_{MPP}$ (Tension nominale DC)	41V
$I_{MPP}$ (courant continu nominal), $I_{SC}$	4A, 4.58A
$V_{OC}$	48V
Cellules par module	72

**Tableau. IV.2.** Principaux paramètres du module PV modélisé [22].

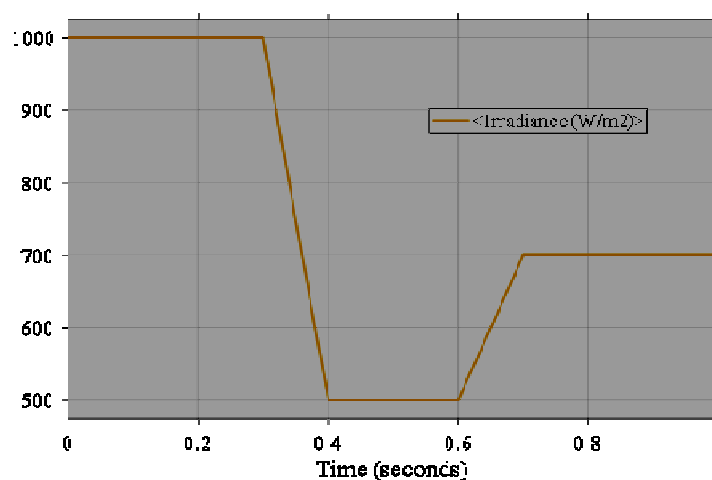
Les convertisseurs de puissance Buck éleveurs DC/DC sont dédiés à la conversion d'une énergie provenant des sources d'énergie renouvelables à base de systèmes PV. Les courbes (I-V) et (P-V) du panneau PV sont présentées dans la figure IV.6 pour visualiser le MPP lors des changements d'énergie dus à l'irradiation et aux variations de température. La figure IV.6 montre également les paramètres du panneau PV au MPP (tension et courant optimaux correspondants :  $V_M$ ,  $I_M$ ,  $V_{OC}$  et  $I_{SC}$ ).





**Figure. IV.6.a)** Performance des modules PV à différents niveaux d'irradiation et températures, *b)* Irradiations liées aux puissances moyennes [22].

En considérant le module Solar World SW250 Mono ( $P_{MPP/MAX}$ ,  $V_{OC}$  et  $I_{SC}$  de 250,355W, 37,8V et 8,28A, respectivement), l'irradiance d'entrée initiale du générateur PV modélisé est de  $103 \text{ W/m}^2$  lorsqu'il fonctionne à  $25^\circ\text{C}$ . Lorsque l'état d'équilibre est atteint (vers  $t=0,1\text{s}$ ), la tension PV ( $V_{DC\_moyenne}$ ) est de 481 V et la puissance extraite ( $P_{DC\_moyenne}$ ) du générateur est de 14,4 kW. Les variations de l'irradiance sur de courtes échelles de temps (figure IV.7), comme suit : A  $t=0.3 \text{ sec}$ , l'irradiation solaire a diminué rapidement de 1000 à  $500 \text{ W/m}^2$ . Pour le système de contrôle et en raison de la condition MPP, la référence VDC est maintenue à 480 V pour extraire  $P_{MAX}$  de 7,2 kW du réseau PV.



**Figure. IV.7.** Variations de l'irradiance du soleil sur de courtes échelles de temps [22].

## **Chapitre IV Evaluation de Production d'Energie des Systèmes Injectés aux Réseaux Electriques, et Auto-Tracking de Consommation d'Energie des BTS**

---

L'effet de l'irradiation est observé sur toutes les phases de I et V du côté AC de l'onduleur. À  $t=0,6s$ , l'irradiation solaire a augmenté à  $700W/m^2$ , et la puissance extraite a aussi augmenté à  $9,6 kW$ . La variation de l'irradiance (Fig. IV.7) montre également que le site choisi présente des fluctuations beaucoup plus faibles, ce qui confirme de manière anecdotique qu'un tel site donnera une production plus régulière [27].

Un panneau PV de 72 cellules et de caractéristique I-V idéale devrait posséder des  $V_{OC}$  et  $I_{SC}$  de  $0,667 V$  ( $48 V$  pour l'ensemble des cellules du panneau) et  $2,0A$ , respectivement. Une nature non linéaire des cellules PV apparaît de sorte que les sorties du panneau PV (I et P) dépendent de l'ensoleillement terminal de la cellule, de la tension de fonctionnement et de la température (Figures. IV.6).

Quand l'insolation augmente,  $I_{SC}$  dans le panneau PV augmente avec l'augmentation de  $P_{MAX}$ . Ceci est dû au fait que la tension  $V_{OC}$  dépend logarithmiquement des irradiations solaires, bien qu'une proportionnalité directe existe entre  $I_{SC}$  et l'intensité radiante.

### **IV. 13. Conclusion**

Quand les sources renouvelables d'énergie basées sur le photovoltaïque sont exploitées, elles peuvent réduire les coûts d'exploitation et les problèmes environnementaux des BTS, et offrir des avantages lors du suivi des MMP, tels que des charges à tension constante, une connexion directe entre le module PV et la batterie à des niveaux de luminosité faibles.

### **IV.14. References**

[1.] Luca chiaraviglio, Delia Ciullo, Michela Meo, Marco Ajmone Marsan "Energy Aware UMTS Access Network" - Politecnico di Torino, Torino, Italy

[2. ] "Telecommunication Contributes to a Carbon-lean economy", Ericsson, visit: [www.climateactionprogramme.org](http://www.climateactionprogramme.org).

[3]. T. ESRAM, P. L. CBAPMAN, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, pp. 439-449, Jun. 2007.

[4]. Koutitas, George, and Panagiotis Demestichas. "A review of energy efficiency in telecommunication networks." *Telfor journal* 2.1 (2010): 2-7.

[5]. A. Vukovic, "All-optical Networks – Impact of Power Density", Panel on "Challenges of Electronic and Optical Packaging in Telecom and Datacom Equipment", Maui, Hawaii, USA, July

2003. [6]. Jyrki T.Louhi  
''Energy Efficiency of Modern Cellular Base Station'' -Nokia Siemens  
Networks, Radio Access, Finland. [7].  
Bhardwaj, I., et al. "Efficiency Gains, Alternative Sources and Environmental Tracking  
Systems for Telecommunications Networks." *J Nucl Ene Sci Power Generat Techno* 10 9  
(2021): 2.  
[8]. Lubritto A, Petraglia C, Vetromile F, Caterina M, Logorelli G, et al. (2010) New  
energy for telecommunications power systems, Proceedings of (INTELEC 07). p: 443.  
[9]. Pachauri, Rupendra Kumar, and Yogesh K. Chauhan. "Hybrid PV/FC stand alone  
green power generation: A perspective for Indian rural telecommunication systems." 2014  
International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques  
(ICICT).IEEE, (2014). [10]. "Energy -savings  
solutions helping mobile operators meet commercial and sustainability goals worldwide,  
press information June-2008@Ericsson, www.ericsson.mobi.  
[11]. Md M. Rahman, Overview of energy saving aspects in 2G and 3G Mobile  
Communication Networks, Thesis in Electronics /Telecommunications,  
Stockholm, Sweden November 20.09)  
[12].Pal, Nnoli Kosisochukwu, and Bolu Jones Ifeanyi."Technical overview of all sources  
of electrical power used in BTSs in Nigeria." *International Research Journal of  
Engineering and Technology* 4.02 (2017): 18-30.  
[13]. Steve Roy 'Energy logic for Telecommunication', Global marketing, a white paper  
from the experts in business critical continuity.Emerson network power  
[14].Telefonaktiebolaget, Ericsson LM. (Stockholm, SE),  
<http://www.freepatentsonline.com/5903433.html>  
[15].Nguyen, C. V., Nguyen, M. T., Quyen, T. V., Le, A. M., & Truong, L. H. (2020). *The  
Hybrid Solar-RF Energy for Base Transceiver Stations. Wireless Communications and  
Mobile Computing, 2020, 1–10*.doi:10.1155/2020/8875760  
[16]. W. Margaret Amutha, V. Rajini, Techno-economic evaluation of various hybrid  
power systems for rural telecom, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume  
43,2015. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.103>.  
[17]. Amole, Abraham Olatide, et al. "Comparative Analysis of Techno-Environmental  
Design of Wind and Solar Energy for Sustainable Telecommunications Systems in

Different Regions of Nigeria." *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 11.4 (2021): 1776-1792.

[18]. A. S. Jacob, R. Banerjee, and P. C. Ghosh, "Sizing of hybrid energy storage system for a PV based microgrid through design space approach," *Appl. Energy*, vol. 212, no. November 2017, pp. 640–653, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.12.040.

[19]. Azary M T, Sabahi M, Babaei E (2019) Solar–wind hybrid renewable energy system: A review. *Int J Circ Theor Appl.*, 1–24. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.223>

[20]. Li W, Gu Y, Luo H, Cui W, He X, Xia C (2015) Topology Review and Derivation Methodology of Single-Phase Transformerless Photovoltaic Inverters for Leakage Current Suppression. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 7, pp. 4537–4551, July 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2399278.

[21]. Kimball J W, Flowers T L, and Chapman P L (2004) Low-input-voltage, low-power boost converter design issues. In *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 2, no. 3, pp. 96–99, Sept. 2004, doi: 10.1109/LPEL.2004.839640.

[22]. Bouhamida, H. Allah, et al. "PV Energy Generation and IoT Power Consumption for Telecom Networks in Remote Areas." *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 6.1 (2021): 1-11.

[23]. Tsai H -L, Tu Ci-S, and Su Yi-J, Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science WCECS 2008, October 22 - 24, San Francisco, USA (2008). At: <http://ir.dyu.edu.tw/handle/987654321/16992>

[24]. Angrist S. W., *Direct Energy Conversion*, Allyn and Bacon, Inc., 4th edition, 177–227 (1982).

[25]. Wasynczuk O (1983) Dynamic Behavior of a Class of Photovoltaic Power Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 9, September 1983, pp.3031–3037

[26]. Phang J C H, Chan D. S. H., and Philips J. R (1984) Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters. *Electronics Letters*, 20(10) 406–408 (1984). doi:10.1049/el:19840281.

[27]. Lave M, Kleissl J (2010). Solar variability of four sites across the state of Colorado. *Renewable Energy*, 35(12), 2867–2873. doi:10.1016/j.renene.2010.05.013

# *Chapitre V*

**Résultats et discussions**

## V.1 Partie A: Coûts compétitifs des systèmes photovoltaïques pour BTS en zones éloignées

### V.1.1. Alimentation des BTS en réseaux de télécoms

La production d'électricité utilise principalement des combustibles fossiles et fissiles (FF), et l'utilisation systématique de ces derniers, tels que le pétrole, le charbon ou le gaz naturel, permet de réduire les coûts de production, mais entraîne un rejet massif de gaz polluants et de gaz à effet de serre [1]. 40% des émissions mondiales de carbone (CO<sub>2</sub>) proviennent de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles, et de l'énergie nucléaire, qui n'émet pas directement de CO<sub>2</sub>, et qui souffre généralement d'une mauvaise image médiatique en raison des risques importants qu'elle comporte [2]-[4]. Toutes les interventions qui améliorent les moyens de subsistance des familles rurales pauvres dans les zones reculées du Maghreb auront un impact positif sur le niveau de vie, impliqueront des solutions technologiques et amélioreront probablement la production agricole, ce qui, à son tour, peut contribuer à la réduction de la pauvreté. Les systèmes hybrides d'énergie verte (HGES) ont été davantage exploités pour alimenter une station émettrice-réceptrice de base mobile (BTS) en électricité propre, ou pour évaluer la disponibilité de l'énergie dans les réseaux intelligents (SG) de ces zones. Dans cette partie, un HGES a été modélisé pour produire de l'énergie à partir de PV/Wind HGES dans des sites BTS ou SG connectés au réseau, en utilisant MATLAB pour résoudre un modèle théorique, et simulé avec une configuration appropriée pour l'analyse des performances et le dimensionnement optimal. Bien que les risques d'accidents liés à leur exploitation soient très faibles, les conséquences d'un accident seraient désastreuses, et le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux [5], [6]. Même si de nombreux pays (comme l'Algérie) sont aujourd'hui excédentaires en matière de production d'électricité, l'avenir n'est pas aux ressources FF, les réserves diminuant constamment et les prix fluctuant énormément en fonction de la conjoncture économique.

Dans le domaine de l'information par exemple, les réseaux de télécommunication (TNs) se sont étendus aux zones reculées du pays (comme les sommets, les forêts et les déserts) et la demande de connectivité est croissante. Les TN sont confrontés à leur inexistence dans ces régions et/ou à l'instabilité des réseaux électriques (leurs sources d'énergie). Les générateurs diesel, sur lesquels les sociétés de télécommunications ont

longtemps compté dans ces régions, fonctionnent à un faible niveau d'efficacité, sont devenus plus chers à exploiter et produisent de fortes émissions de CO<sub>2</sub> [7].

De plus, les changements climatiques menacent aujourd'hui de façon imminente la prospérité dont jouit l'humanité, de sorte que nous devons protéger les écosystèmes et sauvegarder la biodiversité [8]. De gros efforts ont été faits en Algérie pour optimiser les coûts énergétiques en convertissant les stations émettrices-réceptrices de base (BTS) intérieures en stations extérieures pour éliminer l'utilisation de climatiseurs [9], en installant des équipements économes en énergie [10] et en utilisant des sources d'énergie verte pour alimenter les sites de télécommunications [11].

De même, le déploiement accru des énergies renouvelables (ER), en particulier de l'énergie solaire photovoltaïque (PV), qui a atteint des niveaux historiques, de même que l'hydroélectricité, la biomasse pour l'énergie géothermique et l'énergie éolienne terrestre peuvent toutes fournir de l'électricité de manière compétitive par rapport à la production d'électricité à partir de combustibles fossiles où de bonnes ressources et structures de coûts existent [12-14]. Aujourd'hui, les capacités de production d'énergie renouvelable attribuées ont enregistré de nouvelles additions qui peuvent être à la baisse rapide des coûts et de la compétitivité, en particulier pour le solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne [15].

Dans cette première partie de notre thèse, nous voulons nous concentrer sur les projets solaires PV les plus compétitifs dans deux (2) sites distingués : Tamanrasset (bénéficiant d'un rayonnement abondant avec un ciel clair) dans le sud algérien, et Tunis (nord de la Tunisie), en termes de capacité et de coût. Notre objectif ici est de configurer un système à base de PV fournissant des BTS afin d'éviter que les touristes étrangers ne se perdent dans l'immense désert de Tamanrasset et de les aider à profiter de leurs vacances. Nous avons utilisé le logiciel PVsyst [16], pour déterminer le comportement des systèmes en fonction des bases de données sur différents sites géographiques, ainsi que les paramètres techniques des différents composants.

Le logiciel PVsyst utilisé ici propose trois niveaux de systèmes PV, correspondant aux différentes étapes du développement d'un projet réel. Premièrement, nous visons à identifier l'outil sur lequel notre enquête est basée, et à évaluer les données pour analyser la performance du système qui alimentera les BTS mobiles dans les zones éloignées. Le système conçu pour alimenter un BTS dans la région de Tamanrasset se compose d'une ER à base de PV comme source d'énergie, où PVsyst coordonne, mesure et accède à un système à base de PV. Une fois que la zone et la charge sont caractérisées, les techniciens BTS peuvent choisir



des constituants dans une base de données d'éléments pour calculer la mesure de chaque constituant.

### V.1.2. Présentation du logiciel PVSYSYSTEM

La performance de notre système est basée sur une simulation étudiée par PVSYST, qui établit une performance globale du système PV autonome et génère les données de ressources pour l'année entière. Les résultats de notre système sont discutés via des outils de simulation comme les ressources énergétiques potentielles, le dimensionnement des composants, la production d'énergie d'un système PV autonome et les pertes du système.

Le rayonnement global et la température sont des paramètres clés pour assurer le bon déroulement de la simulation, de sorte que les bénéfices solaires de l'installation dépendent fortement de l'intensité annuelle de l'ensoleillement. Le modèle simulé, dimensionné techniquement selon les spécifications du projet, en utilisant l'outil de simulation PVsyst, se compose de modules PV, d'onduleurs et d'un réseau d'interface réseau [16].

### V.1.3. Evaluation et analyse

L'emplacement idéal de Tamanrasset (Comme Fig. 1 l'indiqué) présente un rayonnement solaire global annuel le plus élevé (Figure 2) de  $270\text{W/m}^2$ , suivi par Tunis :  $206,4\text{W/m}^2$ . Les coordonnées de Tamanrasset sont  $22^{\circ}47'20''\text{N}$  et  $5^{\circ}31'32''\text{E}$ , Elle est située à une altitude de 1.320 m, où des températures très élevées de plus de  $47^{\circ}\text{C}$  ont été enregistrées. Les angles d'inclinaison des panneaux nécessaires pour que le soleil tombe sur les périodes de temps, et par conséquent donnent une production optimale du champ, nous permettant de profiter au maximum de la lumière du soleil pendant la journée. Nous présentons ici une étude comparative des performances des systèmes photovoltaïques reliés au réseau sur les sites de Tamanrasset et de Tunis en utilisant le PVsyst. Les angles d'inclinaison des plans inclinés des deux sites sont fixés à  $23^{\circ}$  et  $30^{\circ}$ , respectivement.

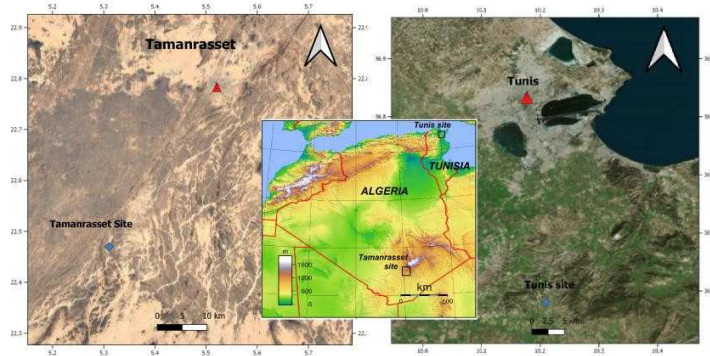


Figure.V.1. Emplacements des sites de Tamanrasset et de Tunis.

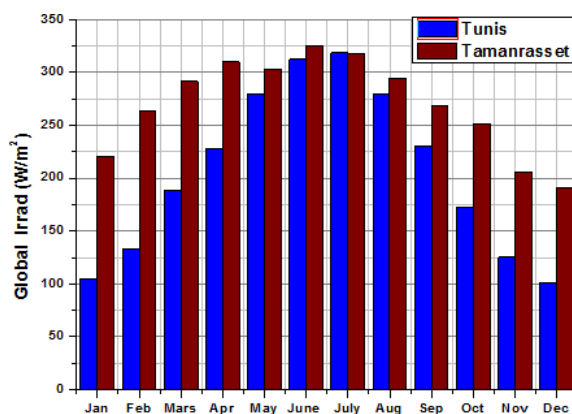


Figure.V.2.Rayonnement solaire global annuel dans les deux zones.

#### V.1.4. Analyse des résultats de PVSyst

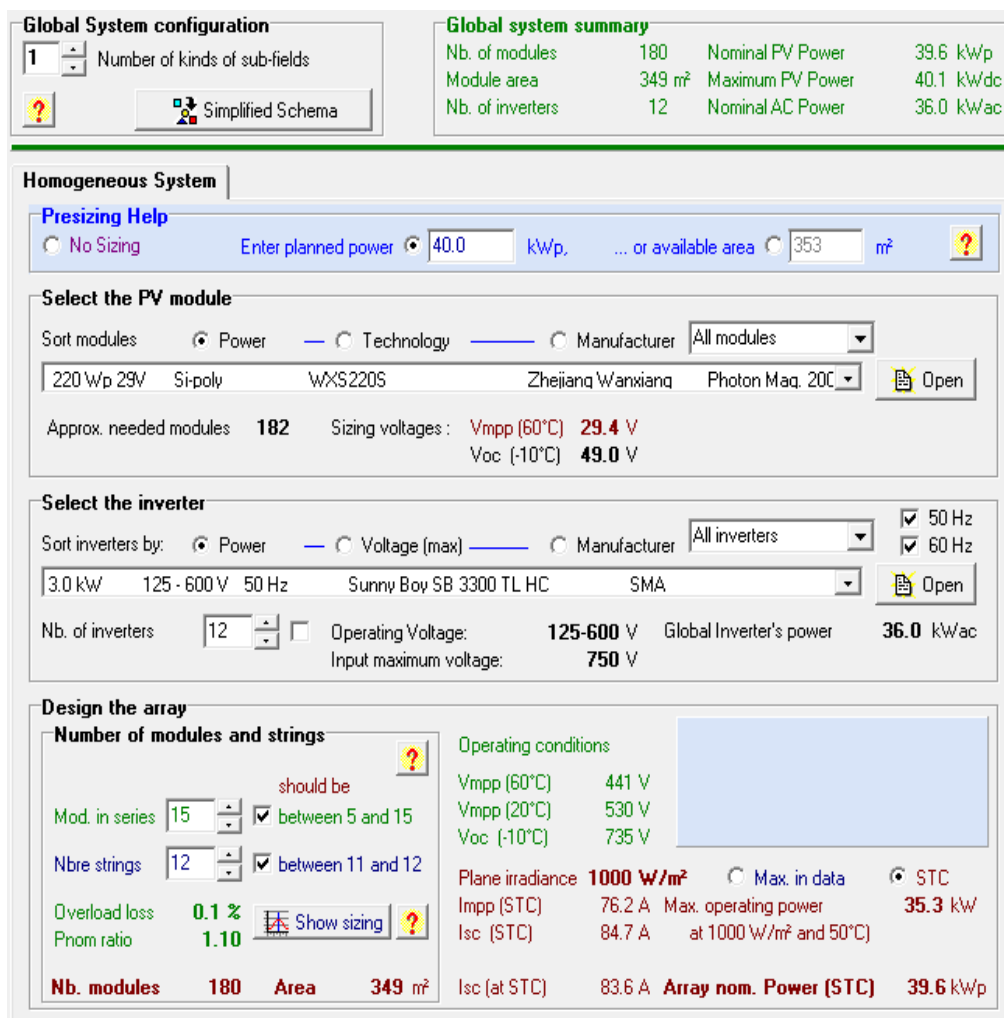
Puisque les deux pays étant situés dans l'hémisphère nord, la meilleure façon d'orienter les panneaux photovoltaïques est de les orienter vers le sud, car les cellules solaires doivent être orientées vers la trajectoire du soleil, afin d'obtenir un rayonnement solaire maximal et une meilleure production d'énergie des panneaux photovoltaïques. Le système étudié implique des BTS mobiles dans des zones éloignées de six pays (principalement deux d'entre eux à des fins de comparaison), et se concentre sur la gestion de l'offre et de la demande d'électricité, et sur l'intégration des ressources énergétiques décentralisées dans les TN. En utilisant PVSyst, à la différence de l'appareil de dimensionnement, le type et la taille des composants sont indiqués. Il fournit une analyse illustrative du système, collecte les données relatives aux charges et à la puissance solaire, et modélise des composants photovoltaïques et électriques de différentes tailles pour répondre à une demande.

#### V.1.5. Dimensionnement du système PV alimenté par le réseau

Le dimensionnement du système PV, prenant en compte les paramètres techniques des modules et du convertisseur, est présenté dans Fig. V.3. Comme mentionné ci-dessus, un générateur PV alimenté par le réseau a été considéré, sans batteries, pour alimenter un village de 20 ménages, chaque ménage ayant une consommation journalière de 2KWh ; la puissance globale est donc estimée à 40KWh.

A cette fin, les modules 29V/220W du système PV Si-poly, la marque Zhejiang Wanxiang WXS220S, le convertisseur de puissance 3KW avec une fréquence de 50Hz à une gamme de tension de 125 à 600 V, et une marque SMA référencée Sunny Boy SB 3300 TL HC, ont été choisis.

Ces paramètres sont considérés comme constants pour les deux sites : même puissance, mêmes modules et mêmes convertisseurs d'énergie. Outre les lignes du réseau, la boîte à fusibles et le compteur électrique, les principaux éléments utilisés pour configurer ce système PV connecté au réseau sont les onduleurs et les modules PV. Ces derniers produisent du courant continu (courant et tensions) et l'onduleur assure la conversion du courant continu en courant alternatif.



**Figure. V.3.** Dimensionnement des systèmes PV connectés au réseau pour les deux sites.

Les sorties de l'onduleur CA sont fournies au réseau par un compteur électrique et une boîte à fusibles. Un onduleur (dans les systèmes PV connectés au réseau) fonctionne en phase avec le réseau et produit en permanence une sortie sinusoïdale. Quant à la connexion au réseau, elle peut être réalisée à partir des bornes de sortie de l'onduleur avec la connexion d'un compteur électrique et d'un disjoncteur dans une boîte à fusibles [26].

### V.1.6. Production/valorisation du système lors de l'injection dans le réseau

Dans le tableau 1 (qui résume les résultats présentés ci-dessous), les paramètres les plus élevés de rayonnement solaire global annuel et de puissance sont enregistrés. La puissance continue fournie par les panneaux photovoltaïques Si-poly, injectée dans le réseau d'énergie en tenant compte des pertes dans les composants électriques, les panneaux photovoltaïques et l'efficacité du système sont également calculés ici.

Toutes les valeurs calculées mentionnées dans les bilans et les principaux résultats ont été obtenues mensuellement et annuellement (les moyennes de température, le rendement et la sommation pour l'irradiation et l'énergie sont donnés en valeurs moyennes). Comme le montrent les résultats de l'analyse sommaire illustrés par le tableau 1, la production annuelle la plus élevée de 73863 kWh a été enregistrée à Tamanrasset, avec une contribution de 7042 kWh en Mars.

Nous notons également que le rayonnement solaire en juillet est le plus élevé avec 236 kWh/m<sup>2</sup> comparé à celui de 217 kWh/m<sup>2</sup> en mars, alors que les températures sont respectivement de 28,40 et 17,40°C, ce qui influence la diminution de la production des panneaux et les pertes plus élevées de la collecte et du système à des températures supérieures à 25°C.

**Tableau V.1.** Résumé des résultats mensuels et annuels (Bilans et principaux résultats des systèmes PV Si-poly de 39,6 kWc) obtenus pour les deux sites : Tamanrasset (en bleu) et Tunis (en rouge).

	$G_{\text{GlobHor}}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$T_{\text{Amb}}$ (°C)	$G_{\text{GlobInc}}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$G_{\text{GlobEff}}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$E_{\text{Array}}$ (kWh)	$E_{\text{Grid}}$ (kWh)	$\text{Eff}_{\text{ArrR}}$ (%)	$\text{Eff}_{\text{SysR}}$ (%)
Janvier	164/78	11.8/13.5	219.7/117.3	214.1/114.1	7052/3881	6721/3695	9.19/9.47	8.76/9.02
Février	177/89	13.8/13.3	217.8/119.1	212.3/115.6	6799/3872	6479/3672	8.94/9.31	8.52/8.83
Mars	217/140	17.4/13.1	238.2/168.2	231.9/163.6	7387/5449	7035/5184	8.88/9.27	8.46/8.82
Avril	223/164	21.8/14.7	219.3/171.3	212.9/166.1	6685/5521	6369/5249	8.73/9.23	8.32/8.77
Mai	225/208	25.4/18.2	204.5/198.3	198.1/192.3	6192/6263	5895/5956	8.67/9.04	8.25/8.60
Juin	234/225	28.1/21.7	203.5/204.3	196.7/197.7	6047/6297	5758/5990	8.51/8.82	8.10/8.39
Juillet	236/237	28.4/25.3	209.7/220.0	202.6/212.9	6218/6586	5921/6263	8.49/8.57	8.08/8.15
Aout	219/208	27.9/26.5	208.3/210.3	202.0/204.1	6213/6341	5919/6038	8.54/8.63	8.13/8.22
Septembre	193/166	25.9/26.5	201.9/190.0	196.4/184.6	6098/5754	5818/5478	8.65/8.67	8.25/8.25
Octobre	187/128	22.3/21.9	218.6/168.9	213.1/164.4	6714/5296	6406/5047	8.79/8.98	8.39/8.56
Novembre	148/90	18.2/17.7	188.8/137.1	183.7/133.1	5909/4401	5634/4192	8.96/9.19	8.55/8.76
Decembre	142/75	13.8/14.80	192.7/121.8	187.4/118.4	6198/3999	5909/3808	9.21/9.41	8.78/8.95
Année	2365/180	21.27/18.89	2522.9/2026.5	2451.2/1966.9	77511/63661	73863/6057	8.80/8.99	8.38/8.56

### V.1.7. Productions normalisées

Les pertes de collecte, les pertes du système et l'énergie utile produite par kWp/jour installé (productions normalisées) ont été évaluées à partir des simulations, comme on peut le voir sur la figure 4. Définies par les normes IEC [27], ces productions normalisées sont des variables standardisées pour évaluer précisément la performance du système PV. Les pertes de collecte (pertes de capture du générateur PV), les pertes du système et l'énergie utile produite ( $L_c$ ,  $L_s$  et  $Y_f$ ) sont respectivement de 1,15 kWh/kWp/jour, 0,21 kWh/kWp/jour et 4,19 kWh/kWp/jour pour Tamanrasset, et de 1.55 kWh/kWp/jour, 0.25 kWh/kWp/jour et 5.11 kWh/kWp/jour pour Tunis, comparables à celles de [28] qui sont respectivement de 1.0 kWh/kWp/jour, 0.1 kWh/kWp/jour et 4.42 kWh/kWp/jour.

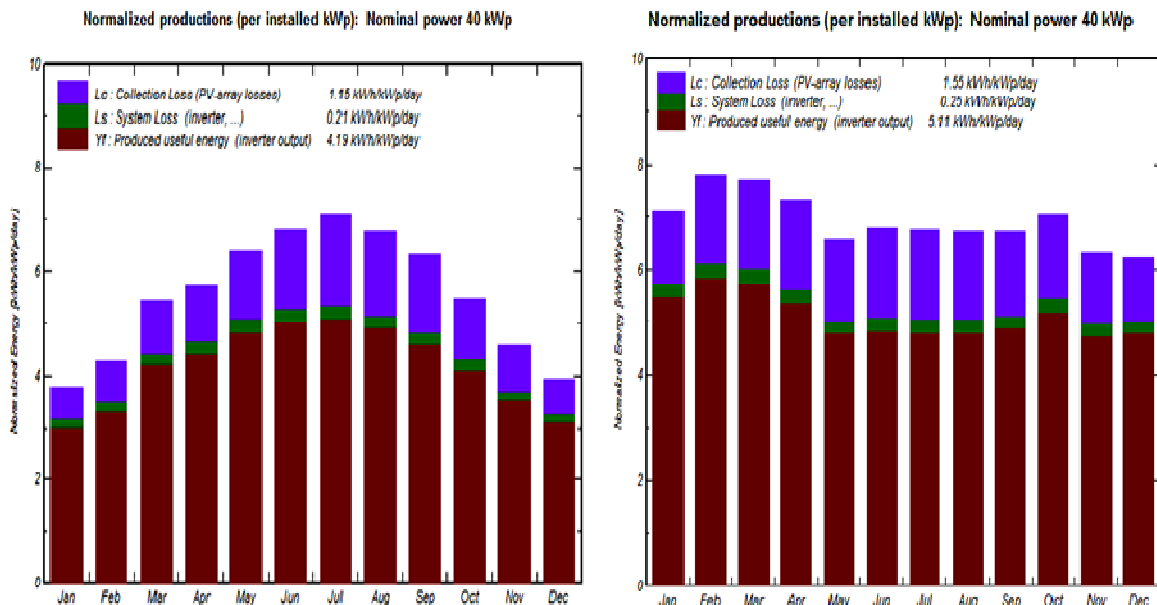


Figure.V. 4. Productions d'énergie normalisées par kWp installé, dans : a) Tamanrasset, b) Tunis

### V.1.8. Evaluation économique

Le coût d'un système solaire PV dépend de plusieurs facteurs. En se basant sur le marché international du PV, et pour uniformiser les résultats, nous nous sommes basés sur les prix européens, dans la mesure où le marché algérien n'est pas encore mature dans ce domaine ni administré, donc la Tunisie et le Maroc suivent l'Europe.

En conséquence, il a été constaté que le prix global de notre système qui sera le même pour tous les sites considérés, de sorte que nous pouvons évaluer le retour sur investissement

pour chaque site suite à sa production. Les résultats moyens obtenus sont tels que les productions du système, les productions normalisées, les productibles, les pertes des champs, les indices de performance, et les pertes du système sont respectivement dans :

- Tamanrasset : 73863kWh/an, 5,11kWh/kWc/jour, 1866kWh/kWc/an, 1,55kWh/kWc/jour, 0,739, et 0,25 kWh/kWc/jour.

- Tunis : 60571 kWh/an, 4,20 kWh/kWc/jour, 1533 kWh/kWc/an, 1,14 kWh/kWc/jour, 0,756 et 0,21 kWh/kWc/jour.

Selon les résultats obtenus à partir d'une évaluation économique de notre système connecté au réseau, on remarque que l'investissement net global n'a pas de valeurs trop différentes sauf dans le cas d'Alger et de Tamanrasset, ce qui se reflète dans les produits importés d'Europe, et aussi les conditions de travail dans le sud. Ensuite, et suivant la même évaluation économique et considérant la production annuelle du système et le retour d'inversion sur 20 ans, il a été déduit que le coût de l'énergie produite est la même valeur de 0,16 pour Perpignan et Alger, également la même valeur pour Tunis et Casablanca de 0,14€/kWh, le prix de revient maximum par kWh est celui de Francfort à 0,23€/kWh, tandis que la valeur minimum est celle de 0,12€/kWh atteinte pour Tamanrasset.

L'analyse du bilan financier à long terme (Fig.V. 5) a révélé que notre système n'est pas rentable sur le site de Francfort ou sur un site aux données météorologiques similaires, car nous remarquons que nous pouvons vendre de l'énergie, mais le gain amortit le montant du projet. Quant au site d'Alger, notre système peut donner un gain positif en seulement 15 ans, alors qu'à Casablanca le retour sur investissement est rentable dans le site de Francfort ou dans un site de données météorologiques similaires, parce que nous remarquons que nous pouvons vendre de l'énergie, mais le gain de l'investissement est seulement de 11 ans.

Une installation à Tunis est rentable après cinq (5) ans, tandis que le plus fabuleux est le site de Tamanrasset, qui a réalisé un profit parfait depuis le premier jour d'exploitation. Pour cette analyse, nous avons considéré les tarifs de vente en Europe, en Tunisie et au Maroc qui sont égaux à 13.75 €. Une analyse précise révèle que le coût de l'énergie utilisée, environ 0,14 €/kWh, est faible. Comme la taxe annuelle de connexion coûte 250€ avec une garantie sur 20 ans.

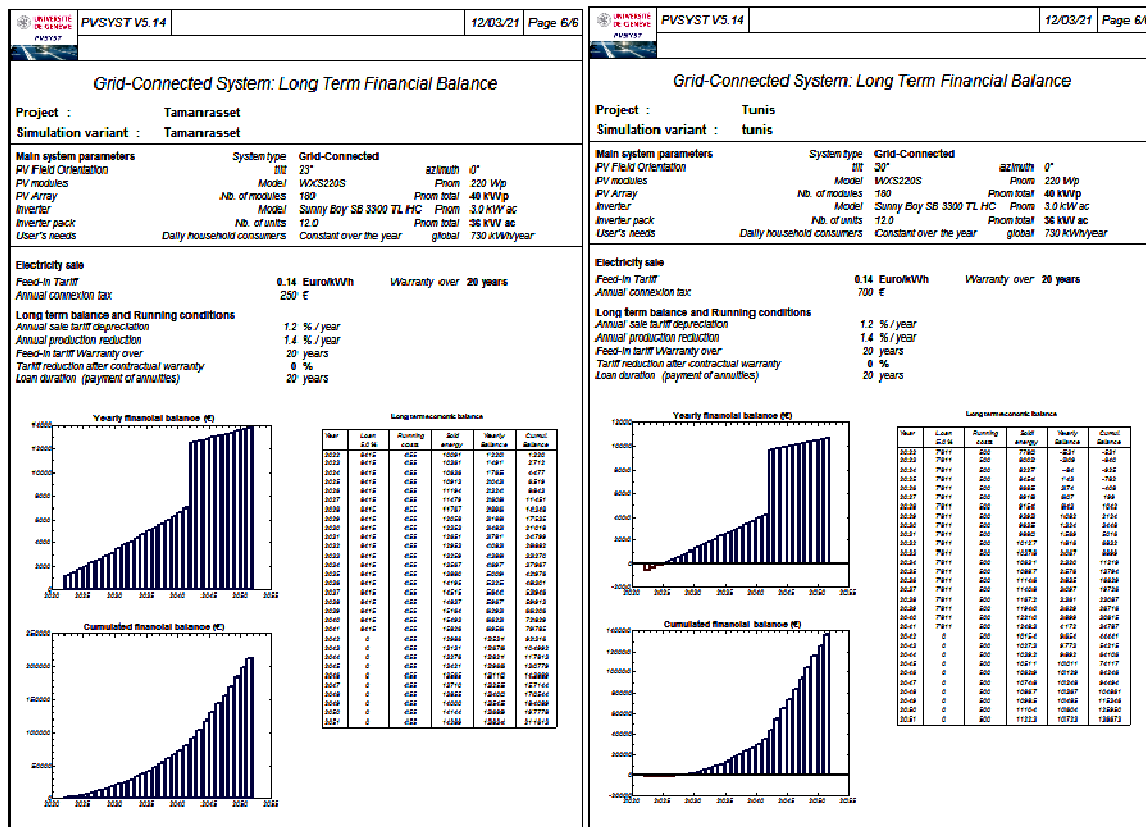


Figure.V. 5. Évaluation économique (rapport financier) du système dans : a) Tamanrasset, b) Tunis.

Cette analyse technico-économique d'un système d'alimentation électrique à base de PV pour une station de base mobile de télécommunication éloignée pourrait être d'un grand intérêt. Pour les TN, un système PV est une alternative à la configuration diesel autonome conventionnelle qui n'est pas économiquement réalisable en raison du coût élevé du diesel. Un tel choix devrait avoir un effet significatif sur le coût d'exploitation de l'opération de télécommunication mobile et également sur l'impact environnemental en raison des émissions élevées de CO2 du système. Dans cette perspective, nous souhaitons configurer un système hybride PV/éolien pour alimenter une BTS afin d'aider les touristes à profiter de leurs vacances et éviter qu'ils ne se perdent dans les immenses zones de Tamanrasset.

La performance simulée du système Si-poly PV de 39,6 kWc connecté au réseau est réalisée à l'aide du logiciel PVsyst (comme outil de simulation). La production d'énergie varie à Tamanrasset en fonction de la puissance, de la qualité des modules PV et des convertisseurs d'énergie : c'est pourquoi l'Académie allemande a choisi ce site pour le lancement du célèbre projet de désert. A partir de cette simulation et en comparant les sites de Tamanrasset et de Tunis, les points suivants sont à noter :

- Annuellement, 73.86 MWh/an est l'énergie injectée dans le réseau dans le site de Tamarasset avec une production spécifique sur une base annuelle par kWp installé est 1866 kWh/kWp/an.
- Un maximum d'énergie injectée dans ce site de 7387 kWh a été mentionné en mars, et un minimum de 5909 kWh a été noté en novembre.
- Le système PV prévu devrait apporter des avantages opérationnels aux BTS installés des TN à Tamarasset, et cette étude peut être réalisée en utilisant différentes technologies de modules PV avec des méthodes d'installation appropriées pour améliorer les performances. Enfin, les ER basés sur le PV pour les TN peuvent être compétitifs et peuvent même faire économiser de l'argent aux consommateurs aujourd'hui et dans le futur.

## **V.2. Partie B: Analyse des performances et optimisation technico-économique des systèmes d'énergie verte pour les zones isolées**

Une simulation technico-économique, réalisée à l'aide du logiciel HOMER, a permis d'évaluer de tel HGES alimentant des BTS ou des SG dans un prototype de zone isolée du Maghreb, et d'optimiser la taille et l'évaluation du système hybride PV-énergie éolienne en fonction des conditions météorologiques pour les zones isolées. De nos jours, l'énergie est un facteur crucial qui a un impact sur le développement économique des pays, où la demande d'énergie a fortement augmenté [1]. En raison du changement climatique, le monde est confronté à la sécurité énergétique et à des problèmes sociaux, économiques, technologiques, environnementaux, géopolitiques et de gestion des risques qui doivent être résolus [2]. Le développement de systèmes hybrides pour la conversion des énergies renouvelables a permis de résoudre la plupart de ces problèmes dans les pays développés, la fourniture de services de santé, l'enseignement à distance, le développement/le soutien du personnel, l'utilisation des technologies de l'information pour fournir/améliorer les services aux communautés rurales/éloignées, dans la formation et l'éducation, la télémédecine, pour améliorer la qualité de vie des personnes défavorisées. [3]

Ce résultat a été obtenu grâce à une infrastructure de télécommunications adéquate alimentée par des systèmes hybrides d'énergie verte (HGES) à faible consommation d'énergie et à faible perte de puissance. [4] Dans les pays en développement, cependant, les pertes financières dues au coût du déséquilibre se traduisent par des pertes de puissance qui réduisent la durée de vie des équipements des clients industriels. [La productivité de l'industrie manufacturière souffre principalement des interruptions d'électricité et de la qualité

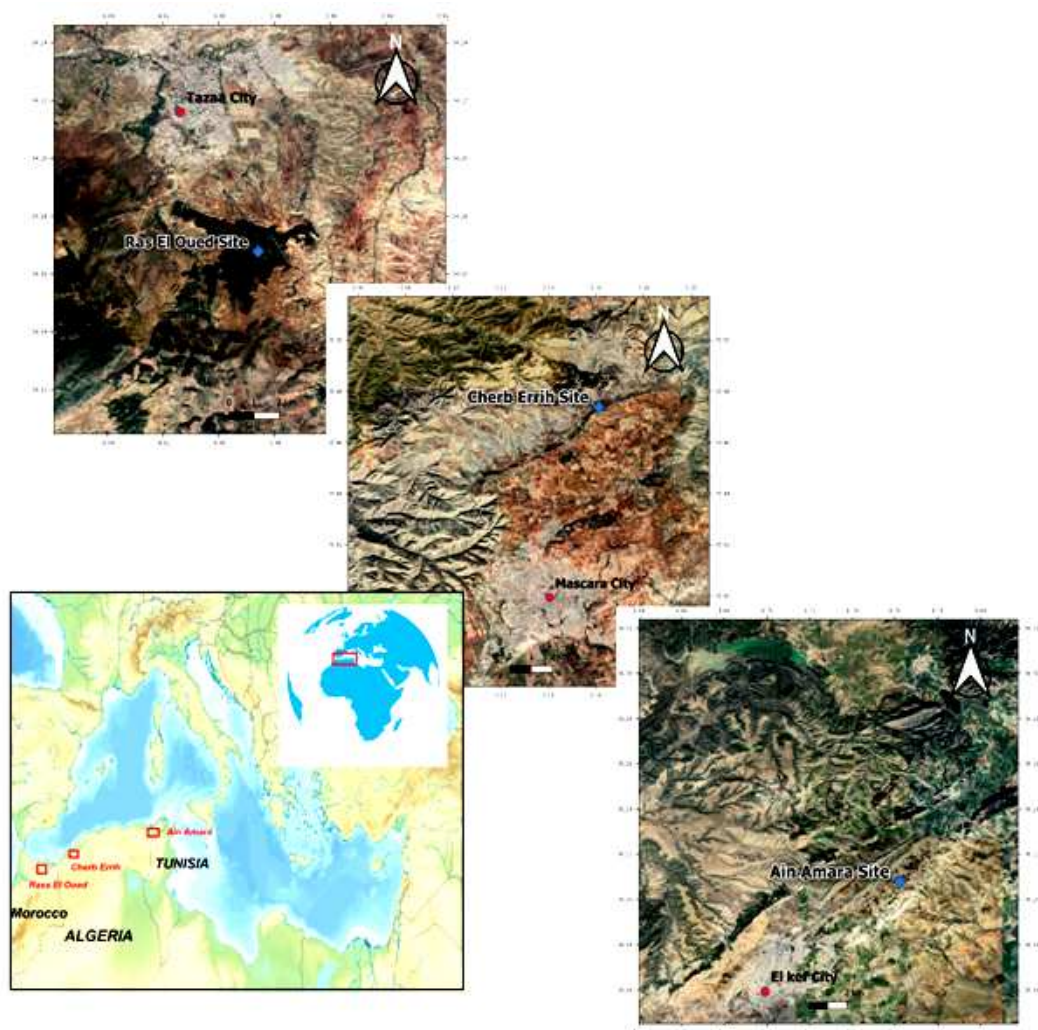


du courant. [Néanmoins, les réseaux de télécommunications (TN) sont nécessaires dans les zones reculées de ces pays, après quoi les opérateurs de réseaux ont mis en place des services mobiles sur les marchés émergents [6].

Les réseaux intelligents sont donc particulièrement importants dans ces régions, compte tenu de la pression croissante sur l'offre et la demande d'énergie liée à l'urbanisation rapide et à l'amélioration de la qualité de vie [7], [8]. Dans les régions éloignées, il est nécessaire de disposer de réseaux électriques à haute tension (HVPG) alimentant de coûteux équipements de micro-ondes et de stations émettrices-réceptrices de base (BTS) [9], [10], [11], ou de SG surveillant la consommation d'énergie et l'efficacité des HVPG à l'aide de TN [12], [13], [14], [15], [16]. Cependant, les TN, qui se sont principalement développées dans les forêts les plus reculées de ces régions, sont confrontées à leur inexistance et à l'instabilité ou même à l'inadéquation des HVPG [17], qui nécessitent d'énormes budgets pour être mis à niveau/réformés [18]. Heureusement, ces régions éloignées disposent d'une énergie solaire et éolienne abondante, de sorte que les HGES restent un choix idéal pour alimenter les équipements BTS alimentés par les HVPG, ou alimenter les SG contrôlant la consommation des HVPG, et donc économiser ces équipements coûteux [19]. En plus des problèmes de consommation majeurs, les TN souffrent d'une longue dépendance vis-à-vis des générateurs diesel (DG), qui fonctionnent de manière coûteuse, avec de faibles niveaux d'efficacité, et produisent de fortes émissions de CO<sub>2</sub> [20]. A l'inverse, les SG impliquent des ressources de charge, distribuées et de stockage d'énergie, et comprennent principalement la production de HGES solaire et éolienne, et la production de ressources distribuées gérables [21], afin de réduire les coûts d'exploitation et les émissions de gaz à effet de serre et de polluants [22]. Il est donc nécessaire d'éviter que cette situation ne soit préjudiciable à la fois aux TN et aux SG. Par exemple, les opérateurs de téléphonie mobile ont besoin d'une alimentation électrique ininterrompue pour maintenir les TN en état de fonctionnement, éviter leur défaillance en interrompant l'alimentation électrique pendant les périodes de délestage, et donc déployer des DG dans les sites BTS comme alimentation de secours [23]. L'Afrique à laquelle appartient l'Algérie, a intensément souffert d'un taux d'urbanisation plus faible et de la rupture des systèmes d'alimentation électrique, continuant à déployer des réseaux 4G, alors que l'industrie mondiale de la communication atteste aujourd'hui d'une concurrence acharnée et d'une stagnation de la croissance des revenus, pour définir les exigences des réseaux 5G. Motivés par les travaux pertinents [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], dans le contexte de la réduction du coût de l'énergie et de l'amélioration du fonctionnement du réseau, nous avons

choisi une zone éloignée en Algérie. Cherb Errih, possédant des détails sur l'emplacement, le climat moyen et la lumière du jour, situé à une altitude de 890m [31], [32], à étudier comme un cas unique dans une zone éloignée-prototype, comme indiqué dans la Fig. 1.

Notre pays en développement doivent faire de gros efforts pour réduire les coûts énergétiques et améliorer le fonctionnement du réseau dans ces zones reculées, optimiser les coûts énergétiques, convertir les BTS intérieurs en BTS extérieurs, éliminer l'utilisation des climatiseurs, installer des équipements à haut rendement énergétique et exploiter les HGES pour alimenter les TN dans la zone isolée mentionnée [33], [34], [35], [36].



**Figure.V.6.** Cherb Errih (zone éloignée en milieu de la carte): Situation géographique et climat global ( $35^{\circ}28'26''\text{N}$ ,  $0^{\circ}09'40''\text{E}$ ), Vitesse moyenne du vent de 8,4 à 9,5 mph ; c) 9,6 à 8,3 mph, tous vents en mars et de mi-novembre à mi-décembre. Fourchettes de températures de bas en haut en juillet : ( $19\text{-}36^{\circ}\text{C}$ ) [31],[32].

Outre les coûts sociaux, l'émigration de personnes qualifiées (appartenant principalement à des régions éloignées) du Maghreb peut empêcher cette région d'investir

dans le capital humain. L'amélioration des moyens de subsistance en milieu rural, au-delà des impacts économiques, peut stimuler l'industrie agricole, apporter des opportunités d'emploi, et donc limiter l'émigration vers le monde développé. D'autre part, les touristes étrangers ont tendance à se perdre dans les déserts et les zones rurales du Maghreb. Pour les aider à profiter de leurs vacances en toute sécurité et éviter de probables situations critiques, les HGES fournissant des BTS doivent être configurés pour les localiser. Cette étude a les deux objectifs principaux suivants : Il décrit les résultats d'un modèle de cellule photovoltaïque (PV) utilisant l'approche Matlab-Simulink, et une solution technico-économique de l'utilisation des HGES hybrides pour alimenter une BTS de télécommunications mobiles dans le RAP, évaluée par le logiciel HOMER. L'analyse des performances et la faisabilité d'une solution technico-économique sont prévues, où une alternative HGES aux DG pour les BTS présente une fiabilité plus élevée et un coût de production d'énergie plus faible [37], [38], [39], [40], [41].

Il vise également à répondre à une question : Comment exploiter au mieux les TN qui réduisent l'isolement rural, appliquer des approches sociotechniques pour renforcer les SG dans les zones reculées du Maghreb, et améliorer les moyens de subsistance des populations rurales ? La nouveauté ici est aussi que :

- Les zones de haute et de basse montagne où l'électrification rurale est insuffisante (comme dans le cas du PAR) sont probablement ciblées par les touristes qui se perdent souvent (ou sont attaqués par des malfaiteurs), ou par les scientifiques qui recueillent des informations sur l'écologie des perchoirs et de la recherche de nourriture des chauves-souris des forêts (qui menacent l'agriculture voisine) dans cet environnement montagneux.
- Les centrales d'énergie conventionnelle au Maghreb sont sujettes à des forces économiques externes, ce qui a fait que cette région dépendant de ces sources d'énergie a connu des variations imprévisibles dans la fourniture d'électricité pour alimenter les TN dont la performance est affectée par ce handicap, et les TN doivent générer de l'électricité pour fonctionner correctement en utilisant les GRES.
- L'identification de critères technico-économiques pour les GRES modélisés révèle des éoliennes de faible contribution à l'alimentation des TN, par rapport aux panneaux PV, et l'évaluation de la disponibilité énergétique dans les SG de ces zones sont ici d'un intérêt primordial.
- Rares sont les recherches optimisant les configurations des modèles de GRES pour alimenter les TN, ou évaluer de manière réversible l'énergie dans les SG dans l'ensemble du

Maghreb. A partir de la littérature et des lacunes constatées dans les travaux reconnus ci-dessus, une étude intermédiaire est réalisée ici pour analyser la performance et optimiser technico-économiquement les coûts des HGES pour l'alimentation des TN dans une RAP de cette région clé, comme porte entre l'Europe et l'Afrique.

- Un HRES basé sur le PV sur la base du logiciel Matlab/Homer à deux objectifs est prédit pour dimensionner correctement et optimiser la performance qui est estimée pour des configurations optimales avec un coût actuel net (NPC) et un coût énergétique nivelé (LCOE) minimum. Cette étude révèle que ce type de HRES présente des avantages environnementaux raisonnables et est économiquement réalisable.

- Sur la base de la comparaison du prix de la vitesse annuelle du vent avec le LCOE et le NPC, l'analyse de sensibilité effectuée ici privilégie les SER à base de PV comme candidats prometteurs pour les TN dans les régions éloignées.

### V.2.1 Modélisation du système PV et MPPT

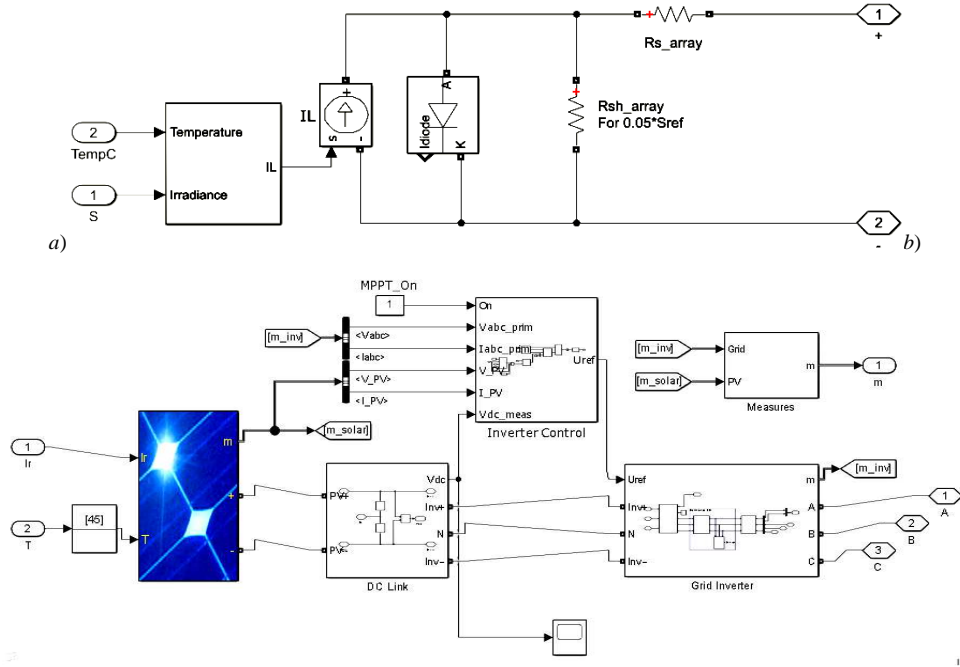
Les RER PV, mis en œuvre avec différentes topologies et méthodologies de contrôle, sont classés en deux catégories principales : les applications connectées au réseau et les applications autonomes [42]. Dans ce dernier cas, un convertisseur CC-CC est utilisé entre une charge CC et les sources PV pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) [43]. Dans le schéma autonome, des batteries comme éléments de stockage sont nécessaires pour les heures de nuit, afin de résoudre le problème de l'installation de nombreux panneaux pour fournir l'énergie dont la charge a besoin [44], mais elles doivent être remplacées fréquemment [45], ce qui augmente le coût global du système [43]. Par conséquent, une topologie connectée au réseau est préférable, car elle peut être mise en œuvre en couplant directement les onduleurs aux réseaux sans inclure de convertisseurs CC-CC [46].

Les besoins de calcul importants désavantagent les techniques MPPT qui peuvent être contrôlées par le système MPPT qui choisit la plus appropriée en fonction des conditions environnementales et des exigences de l'application/charge. Pour simuler le modèle  $V_{OC}$ ,  $I_{SC}$ ,  $V_M$ ,  $I_M$  sont nécessaires, cependant, le système PV a besoin de données précises pour améliorer les performances de notre HGES.

Ici, les cellules PV offrent une tension de sortie plus faible, et la source PV est disponible en soixante (60) panneaux de cellules en série et un seul tableau pour fournir une puissance suffisante à la BTS. Bien que les paramètres des cellules PV puissent être estimés

en utilisant des modèles à double et triple diodes [47] pour décrire le comportement du module PV, le modèle bien connu à une diode (Fig. 2) est adopté ici [48], de sorte que :

$$I_{Out} = I_{PV} - I_S \left[ \exp \left( \frac{q(V_{Out} + I_{Out}R_S)}{kT_{Cell}A} - 1 \right) \right] - (V_{Out} + I_{Out}R_S) / R_{SH} \quad (V. 1)$$



**Figure.V.7.**Circuit équivalent d'une cellule PV à une diode [49] (a) et schéma du système PV (b) par Simulink.

Où  $I_{PH}$ ,  $I_S$ ,  $q$ ,  $k$ ,  $T_{Cell}$ ,  $A$ ,  $R_{SH}$  et  $R_S$  sont respectivement le photocourant, le courant de saturation de l'obscurité de la cellule, la charge des électrons ( $1,6 \times 10^{-19}C$ ), la constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}J/K$ ), la température de fonctionnement de la cellule, le facteur idéal, la résistance shunt et la résistance série. Le courant photo-généré, qui dépend principalement du rayonnement solaire et de la température de travail de la cellule, est : [50]

$$I_{PV} = \left[ I_{SC}(T_{ref}) + K_I (T_{cell} - T_{ref}) \right] \cdot G \quad (V. 2)$$

Où ,  $G$ ,  $K_I$  et  $T_{ref}$  sont respectivement le courant de court-circuit de la cellule à la température de référence ( $25^\circ C$ ) et au rayonnement standard ( $10^3 W/m^2$ ), le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule, la température de référence de la cellule et l'ensoleillement ( $G$  en  $kW/m^2$ ). En outre, le courant inverse de la diode en fonction de la température de la cellule est de

$$I_r = \left[ \frac{I_{SC}(T_{ref})}{e^{\left(\frac{qV_{OC}}{kAT_{ref}}\right)-1}} \right] \cdot \left[ \frac{T_{cell}}{T_{ref}} \right]^3 \cdot e^{\left( \frac{q \cdot E_G \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{cell}} \right)}{kA} \right)} \quad (V. 3)$$

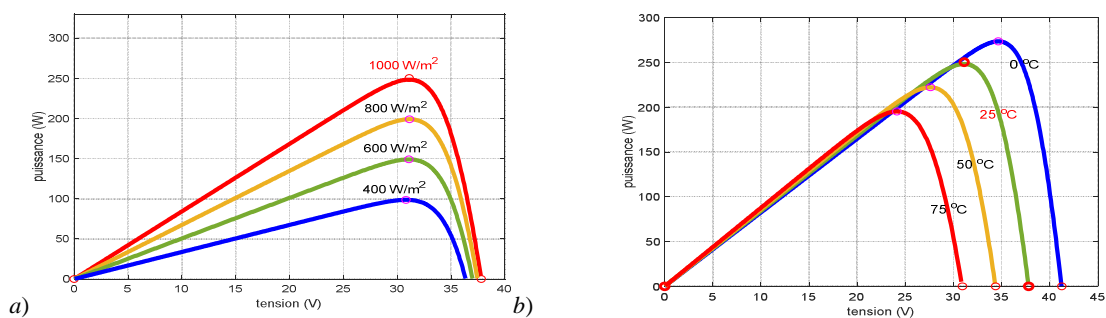
Avec un premier terme donnant le courant de saturation inverse. Le module PV considéré avoir  $n_s$  cellules en série et  $n_p$  cellules, et en configuration parallèle, respectivement (ici  $n_s$  et  $n_p$  sont pris 60 et 1), comme le décrit l'équation ci-dessous caractérisant le comportement I-V pour un modèle le plus simple [51], basé sur les équations 2 et 3.

$$I_{Out} = n_p I_{PV} - n_p I_r e^{\left[ \frac{q(n_p V_{Out} + n_s I_{Out} R_s)}{n_p n_s k T_{ref} A} \right] - 1} \quad (V. 4.a)$$

Où  $I_{Out}$  et  $V_{Out}$  sont le courant et la tension de sortie. Pour observer les effets de la variation de divers paramètres, un module SW250 Mono [52], dont les spécifications du fabricant sont indiquées dans le tableau 1, d'une puissance de 250 W, est considéré. À partir des caractéristiques I-V et P-V, les pics MPP sont affichés en ce qui concerne les changements de puissance dus à l'irradiation et aux variations de température, et les paramètres du panneau PV au MPP sont indiqués, tels que la tension ( $V_M$ ) et le courant ( $I_M$ ) optimaux correspondants, la tension en circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) et le courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ). En condition SC, le VPI (Eq. 2) passe par RSH et RS, puisque la diode n'est pas conductrice, ce qui simplifie essentiellement le circuit en un diviseur de courant. Cependant, à l'état OC, il n'y a pas de chute de tension à travers le  $R_s$  et  $I_{PV}$  circule principalement à travers la diode conductrice. Il convient de mentionner que ni  $I_{SC}$  ni  $V_{OC}$  ne sont affectés par le changement de  $R_s$ , et que le MPP se déplace vers la droite, de sorte que la puissance MPP  $P_{max}$  devrait être en proportion inverse de  $R_s$ , ce qui est en accord avec le facteur de remplissage

$$FF = P_{max} / (V_{OC} I_{SC}) \quad (V. 4.b)$$

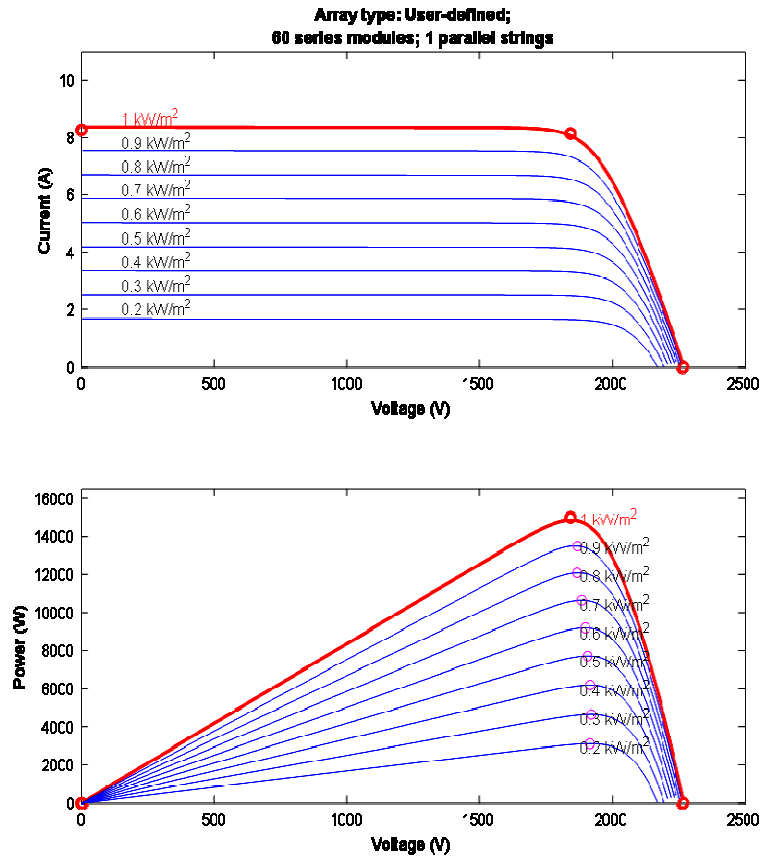
Pour des raisons de simplicité, la méthode de Newton Raphson [49] est utilisée pour calculer le courant  $I_{OUT}$  (Eq. 1). Les figures 3 à 5 illustrent les caractéristiques I-V et P-V typiques d'un modèle de module à diode unique (figure 2) sous différentes irradiations et conditions atmosphériques de température.



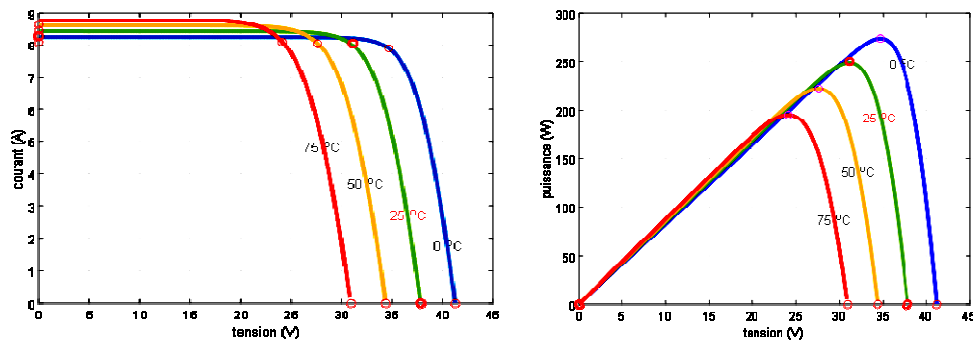
**Figure.V. 8.** Caractéristiques P-V des modules PV sous : a) différents rayonnements et température constante (25 °C), b) températures et rayonnement constant (1000W/m<sup>2</sup>).

Les figures 3 (a) montrent les courbes I-V modèles présentées du Solar World SW250 Mono à quatre irradiances différentes (400 W/m<sup>2</sup>, 600 W/m<sup>2</sup>, 800 W/m<sup>2</sup> et 1000 W/m<sup>2</sup>) et à une température constante (25°C), tandis que les figures 3 (b) illustrent les courbes I-V modèles à quatre (4) conditions de température différentes (0°C, 25°C, 50°C et 75°C) et à une irradiation constante (10<sup>3</sup> W/m<sup>2</sup>), indiquant trois points de fonctionnement clés : I<sub>SC</sub>, V<sub>OC</sub> et PMPP.

Les résultats ont prouvé que les caractéristiques I-V et P-V simulées correspondent tout à fait à celles fournies par les fabricants, et qu'il est possible d'acquérir les paramètres I-V à partir d'un modèle discret précis avec les fonctions du système.



**Figure. V.9.** Caractéristiques I-V (panneau supérieur) et P-V (panneau inférieur) du module PV sous différents rayonnements et à température constante (25 °C).



**Figure. V.10.** Caractéristiques I-V (gauche) et P-V (droite) du module PV dans différentes conditions de température et de rayonnement constant ( $G = 1000\text{W/m}^2$ ).

Matlab-Simulink calcule et analyse le courant et la puissance de sortie de différents modèles de modules PV en utilisant les paramètres électriques typiques ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $K_I$ ) du module choisi. Avec une augmentation du rayonnement, le courant de court-circuit du module augmente proportionnellement alors qu'il y a une augmentation insignifiante de la tension de circuit ouvert (Fig.5), ce qui conduit à une augmentation de  $P_{MAX}$ , comme le montre la Fig.3.

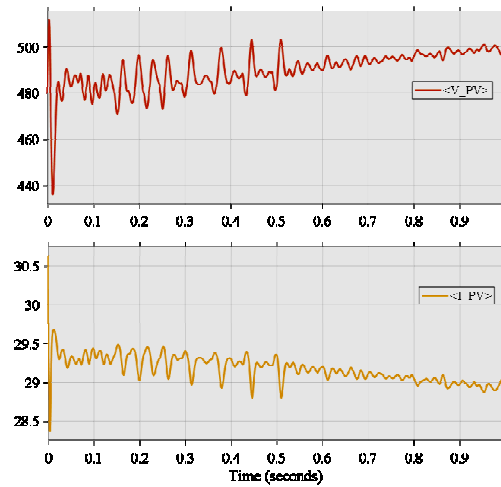


**Tableau.V.2** Caracteristiques dumodule Solar WorldSW250 Mono

Paramètres	Spécifications
Maximum Power point (MPP) ( $P_{max}$ )	250.355W
Voltage at peak power ( $V_{max}$ )	31.1V
Current at peak power ( $I_{max}$ )	8.05A
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	37.8V
courant de court circuit ( $I_{sc}$ )	8.28A
coefficient de Température du courant de court circuit ( $K_I$ )	0.042% /°C
Facteur d'Idéalité (A)	1.3
Longueur x Largeur x Hauteur [mm]	1675x1001x34
Nombre de cellules	60
Dimensions de la cellule [mm]	156 x 156
Matériau de cellules	Si-mono

Contrairement à l'augmentation observée de la tension de sortie ( $V_{OUT}$ ) lorsque l'irradiation augmente avec la température,  $V_{OUT}$  diminue avec la dépendance de la tension de la jonction p-n à la température. Par conséquent,  $V_{OC}$  possède un coefficient de température (CT) négatif de  $-0,33\%/^{\circ}K$ , étant donné qu'une température plus élevée entraîne un  $I_{PV}$  plus important, le courant de sortie ( $I_{OUT}$ ) a une caractéristique de CT positif, de  $0,042\%/^{\circ}K$  [53]. Puisque  $V_{OUT}$  et  $I_{OUT}$  changent avec l'irradiation, les effets des changements de température et d'irradiation doivent être pris en compte dans le modèle de module PV [54]. Il convient de noter que lorsque l'on souhaite obtenir des caractéristiques I-V et P-V à différentes températures et sous différents rayonnements, il faut utiliser la méthode de Hermann-Wiesner pour la conversion I-V [55]. Un fonctionnement amélioré du filtre actif parallèle de lissage des pulsations de courant a été étudié [56], dans le cas d'un module AC-PV composé d'un onduleur flyback à source de courant à un étage et d'un module PV avec des caractéristiques électriques sous  $103W/m^2$ ,  $25^{\circ}C$  et AM de 1,5 :  $P_{DC}=113,6W$ ,  $V_{DC}=33.235V$ ,  $I_{DC}$  (valeur du courant du générateur PV à MPP) de 3.418A,  $I_{SC}=8.28A$ ,  $V_{OC}=37.8V$  (Tableau 1). L'onduleur a été sélectionné sur la base d'une régulation élevée du facteur de puissance, d'une densité de puissance très élevée, d'un rendement élevé et d'une structure simple [56], [57], [58], [59], [60]. La figure 6 montre les formes d'onde de simulation du courant et de la tension de sortie

du module PV choisi. Les résultats montrent une élimination satisfaisante de l'ondulation du courant et de la tension PV à basse fréquence grâce à cette configuration améliorée [56].



**Figure .V. 11.** Formes d'onde de la tension et du courant du module PV.

### V.2.2. Evaluation Techno-économique

Reconnaissant l'extrême importance des zones rurales, centre de la production agricole dans les zones de pauvreté, et au sein des économies du Maghreb, cette étude tend à réduire les coûts d'alimentation électrique et de communication, avec pour objectif final la réduction de la pauvreté dans le contexte de l'amélioration des moyens de subsistance [61]. En termes de couverture du réseau et d'impact énorme sur le coût d'exploitation des systèmes en fonctionnement, L'Algérie comme tout pays du Maghreb n'ont pas joué un rôle positif dans la croissance des TN, en raison de l'état actuel de l'infrastructure électrique [33]. Les systèmes d'électrification PV autonomes peuvent jouer un rôle clé dans un RER en développement du Maghreb, où le soleil brille et le vent souffle pendant presque toute l'année [62]. Pour déterminer comment les différents systèmes renouvelables et hybrides interagissent avec la demande de l'utilisateur final, et sur la base de la disponibilité et du potentiel des RER dans les zones reculées, le logiciel HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable [63]) a été utilisé pour modéliser un système énergétique hybride (HGES). En utilisant Homer, les travaux théoriques précédents sur les HGES comprennent l'optimisation et le coût du cycle de vie [64], [65], [66], [67], [68], la modélisation, la méthodologie de conception et l'optimisation de la taille des systèmes PV autonomes connectés au réseau [69], [70], [71], [72].

De plus, Rozlan et al. [73] ont optimisé une HGES autonome, et d'autres travaux [74], [75], [76], [77], [78] ont réalisé l'analyse de faisabilité technico-économique de différentes

combinaisons de systèmes hybrides PV-éolien. En termes d'analyse de faisabilité, notre système réalisé à l'aide de HOMER a été conçu pour alimenter soit un BTS et/ou un SG, avec une capacité de charge totale qui s'est avérée être de 37 kWh/j.

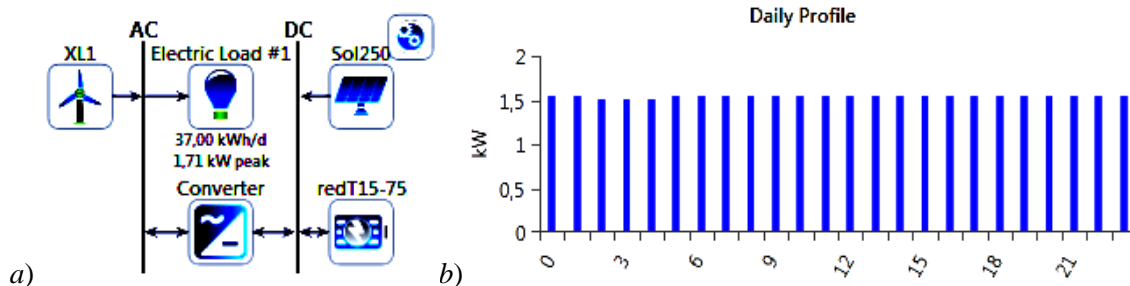


Figure. V.12. a) Configuration générale, et b) Profil BTS quotidien (charge) du HGES PV/éolienne.

Pour modéliser le HGES PV/éolien et décider de la taille de ses composants [52], [79], une charge de pointe de 1,71 kW est considérée. HGES est calculé sur la base d'une simulation horaire en stratégie de charge cyclique et en stratégie de suivi de charge. La charge est fournie par le solaire PV et l'éolienne fournit la charge lorsque les batteries sont déchargées. Le diagramme schématique du HGES utilisée dans la présente étude et le profil de la charge moyenne quotidienne sont présentés respectivement sur les figures 7 a et b. Les composants de la HGES sont un système solaire PV de 3 kW [52] avec l'intégration d'une petite éolienne de 1 kW (Bergey BWC XL.1 [79]), fournissant une production d'énergie qui dépend de la vitesse de démarrage/arrêt, du diamètre du rotor, de la hauteur du moyeu et de la vitesse du vent (Fig.1) disponible pour l'un des trois sites [80]. En mettant à l'échelle les données de [81] pour considérer les moyennes annuelles à long terme, HOMER implique un indice de clarté à partir de la latitude et de la longitude de la zone éloignée.

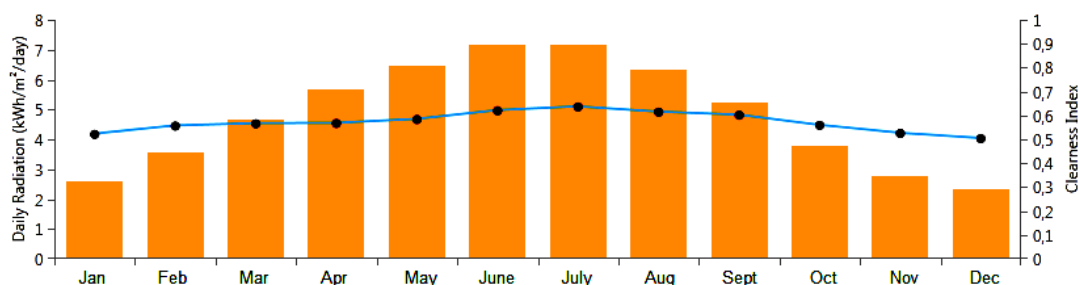
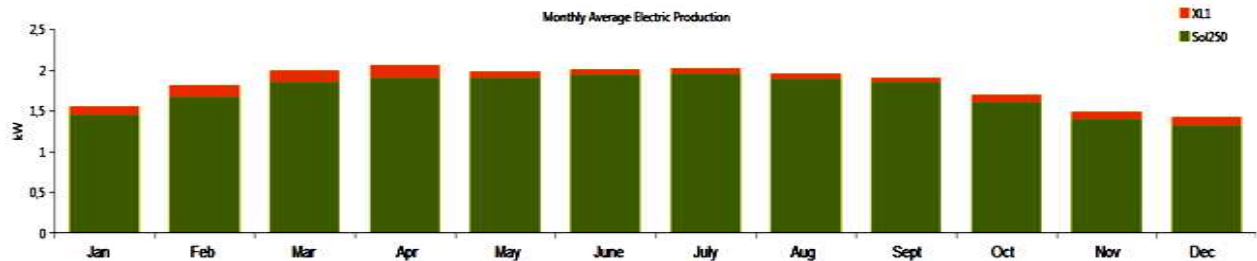


Figure.V.13. Rayonnement solaire quotidien avec l'indice de clarté

La figure 8 montre une variation mensuelle du rayonnement solaire avec l'indice de clarté. Ces données servent d'entrée au logiciel HOMER pour l'analyse. Les données de rayonnement solaire quotidien moyen avec l'indice de clarté. Le rayonnement solaire

quotidien varie de 4,21 à 5,27kWh/m<sup>2</sup>/jour et la moyenne annuelle est de 4,75kWh/ m<sup>2</sup>/jour. L'irradiation solaire globale la plus forte et la plus faible est observée en juillet et en janvier, respectivement. Les vitesses moyennes trimestrielles du vent sont respectivement de 3,75 m/s, et varient de 3,26 (en août) à 4,24 m/s (en décembre [32], [81]). Les profils mensuels moyens de la vitesse du vent pour les trois sites RAP inclus, sont donnés dans Fig. 1. Les productions des composants HGES sont de 15.143kWh/an (solaire) et 0.849 kWh/an, avec un pourcentage de contribution de 94.7% et 5.31%, respectivement. La charge primaire AC, à son tour, consomme annuellement 12.556 kWh/an. La production électrique moyenne mensuelle due la région éloignée est présentée à la Fig. 9 qui illustre la production électrique annuelle totale du réseau, de l'éolienne et des systèmes solaires PV en kWh/an. Les effets de la pénétration des énergies renouvelables sur la consommation du réseau sont clairement visibles. Dans les régions éloignées, la production annuelle d'électricité par les centrales géothermiques est principalement due à la puissance de sortie élevée, en particulier celle du module PV. Pour réduire les coûts énergétiques et améliorer le fonctionnement de la BST ou du micro-réseau intelligent (SMG), HOMER optimise le NPC d'une GHES, donné par :



FigureV. 14. production électrique moyenne mens mensuelle de al région éloignée.

$$NPC = C_i + C_r + \sum_{t=1}^N \frac{C_o + C_f}{(1+i)^t} - C_{sv} \quad (V.5)$$

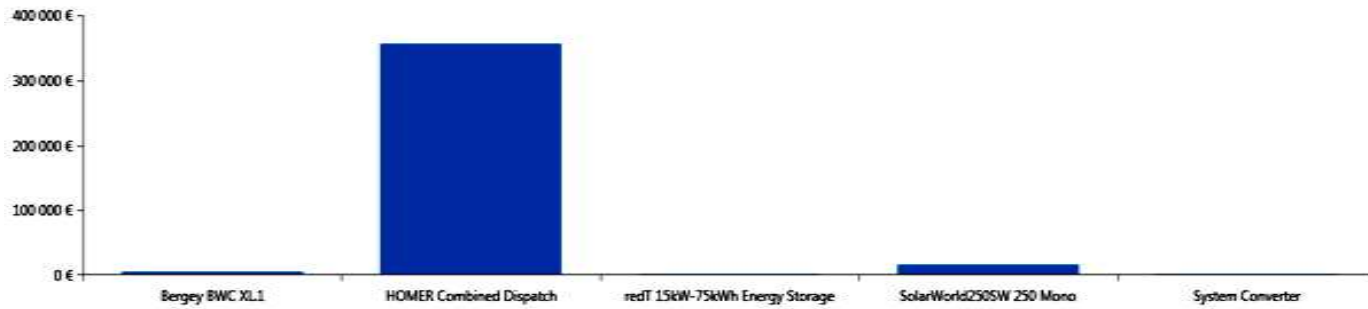
Avec  $C_o$  le coût d'exploitation et de maintenance,  $C_i$ ,  $C_r$  les coûts initiaux et de remplacement respectivement, et  $i$  et  $N$  le taux d'actualisation et la durée de vie du projet respectivement, et  $C_{sv}$  la valeur de récupération, c'est-à-dire la valeur actualisée de tous les revenus que la HGES gagne au cours de sa durée de vie, et les termes précédents sont la valeur actualisée de tous les coûts que la HGES encourt au cours de sa durée de vie, y compris les coûts de carburant, les pénalités d'émissions, les coûts de remplacement, les coûts d'investissement, les coûts d'exploitation et de maintenance (O&M), et les coûts d'achat d'électricité au réseau [20],[82]. Puisqu'il est intéressant de discuter de l'achat et de la vente

d'électricité pour chaque mois de l'année, la simulation HOMER nécessite des paramètres financiers, et les revenus des coûts comprennent la valeur de récupération et les revenus des ventes sur le réseau [83]. Les résultats de NPC et LCOE sont obtenus comme solution par l'analyse HOMER, qui sont affinés en effectuant une analyse de sensibilité. Le principal résultat économique, le NPC total (TNPC), est calculé en additionnant le total des flux de trésorerie actualisés pour chaque année de la durée de vie du projet [82]. TNPC est la valeur par laquelle HOMER classe les configurations de système pour les résultats d'optimisation, et la base à partir de laquelle il calcule le coût total annualisé et le LCOE [65], [84]. A son tour, le coût annualisé  $AC = NPC + CRF$ , fonction du facteur de récupération du capital (CRF) et du TNPC, est utilisé pour analyser les HGES, de sorte que le LCOE et le COE sont donnés par les équations 6 a, b [80],[85] comme suit

$$LCOE = \frac{\text{Capital} \times CRF + O\&M}{\text{Energy generated}} = \frac{\text{Capital} \times CRF + O\&M}{8760 \times \text{CapacityFactor}} \quad (\text{V. 6. a})$$

$$COE = TNPC \times CRF / \sum_{t=0}^{8760} E_{gen}(t) \quad (\text{V. 6. b})$$

En plus de la simulation, HOMER optimise également sur la base de paramètres spécifiques donnés en entrée, afin de fournir un schéma de combinaison optimale qui se traduit par de meilleures performances en termes d'aspects technico-économiques. Le coût d'exploitation (CO) est la valeur annualisée de tous les coûts et rendements autres que les coûts d'investissement initiaux. Les options de HGES, le coût de la production d'énergie, la comparaison entre la contribution de l'éolien et du photovoltaïque, et l'impact de la production d'énergie à partir de systèmes d'énergie renouvelable sur les moyens de subsistance de RAP ont été rapportés ici. Le TNPC, le LCOE et le OC sont respectivement de 381.355,90€, 0.9296€, et 6.280,62€. Un capital initial pour les HGES est estimé à 176.163 €. La figure 10 montre un résumé des coûts, où les HGES éoliennes/PV peuvent être considérées comme la configuration la plus économique. Estimé par HOMER, le coût de l'énergie est de 0,214 €/kWh.



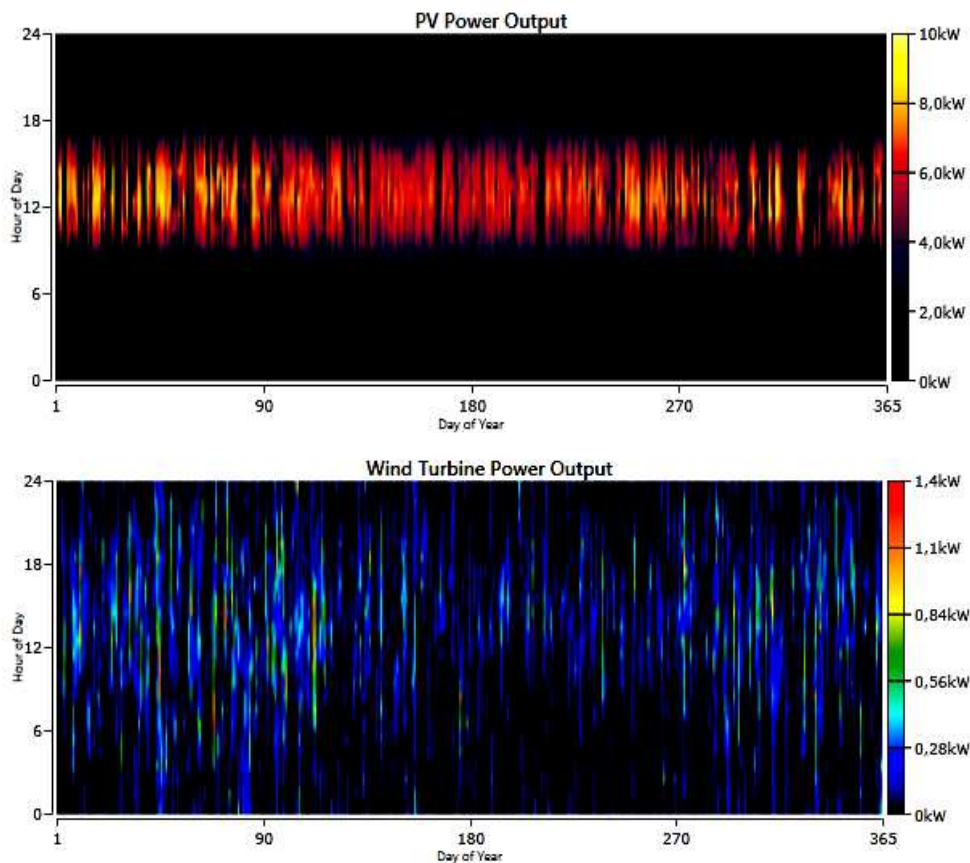
**Figure. V.15.** Résumé des coûts des HGES éolien/PV à la zone éloignée.

L'analyse de sensibilité permet de fournir des informations sur l'optimisation des systèmes pour des variables de sensibilité particulières. En faisant varier l'irradiation solaire et la vitesse du vent, une analyse de sensibilité a été réalisée en simulant une mise en œuvre à long terme et en recherchant les sensibilités des composants. En fonction des sensibilités de la vitesse du vent, de l'irradiation solaire et du prix de l'électricité du réseau (€/kWh), les émissions, la fraction renouvelable, le NPC et le COE sont simulés. Les sensibilités ont été fixées respectivement sur des plages de 3,5-8 kW/m<sup>2</sup>/jour, 6,9-8,8 m/s et 0,084-0,336 €, afin d'analyser la faisabilité de notre HGES analysée sur la base de la réduction des émissions et de la réduction des coûts. Les HGES sont réalisables dans les régions éloignées où les prix de l'électricité du réseau s'avèrent plus chers, mais où l'irradiation solaire globale semble suffisante. Les résultats montrent que les panneaux photovoltaïques contribuent davantage que les éoliennes, c'est-à-dire que l'énergie solaire a un impact sur les HGES configurées. Comme le montre la figure 10, le résumé des flux financiers de tous les composants vise une même charge. Il convient de noter ici que les paramètres de coût des différents systèmes/composants sont basés sur des données recueillies dans des publications antérieures et des hypothèses. Lorsqu'il s'agit de HGES PV-énergie éolienne, le coût d'installation est approprié avec la configuration optimisée pour la région éloignée. Les détails du coût des composants sont listés dans le tableau 2, avec 9,92 kW de panneaux PV, une éolienne de 1 kW et un convertisseur de puissance de 2,1 kW. Les productions annuelles sont de 15.143 kWh/an (PV~94.7%), 0.849 kWh/an (éolienne ~5.31%), contre une consommation annuelle de charge primaire AC et DC de 2.556 et 0 kWh/an, respectivement. Les capacités nominales totales, les rendements moyens, les facteurs de capacité du module PV et de l'éolienne sont respectivement de (9,92;1) kW, (1,73;0,0969) kW, et (17,4;9,69)%.

Tableau V. 3. Paramètres de coût des composants

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
Bergey BWC XL.1	4 796,70 €	5 108,69 €	112,32 €	0,00 €	-4 230,30 €	5 787,41 €
HOMER Combined Dispatch	160 000,00 €	0,00 €	196 025,43 €	0,00 €	0,00 €	356 025,43 €
redT 15kW-75kWh Energy Storage	89,39 €	0,00 €	2 246,45 €	0,00 €	0,00 €	2 335,84 €
SolarWorld250SW 250 Mono	10 843,07 €	0,00 €	5 348,53 €	0,00 €	0,00 €	16 191,60 €
System Converter	433,39 €	583,28 €	235,99 €	0,00 €	-237,01 €	1 015,65 €
System	176 162,54 €	5 691,97 €	203 968,73 €	0,00 €	-4 467,31 €	381 355,93 €

La figure V.16 montre la production quotidienne d'énergie photovoltaïque et éolienne sur une année. La production d'électricité augmente avec une réduction du NPC total et une diminution du LCOE du système, ce qui montre qu'avec un changement des variables de sensibilité, les capacités des composants augmentent, et donc un changement dans la configuration du système.



**Figure. V. 16.** Production annuelle d'énergie PV et éolienne pour la région éloignée considérée.

Par conséquent, une HGES PV-éolienne s'avère être l'option la moins chère par rapport aux autres systèmes. Les coûts énergétiques d'une HGES connectée au réseau sont moins élevés

que ceux d'une alimentation basée sur la production décentralisée pour des profils de charge similaires, et l'éolienne (bien qu'ayant un capital initial moins élevé) contribue moins que la source PV à l'alimentation d'un BTS dans la région éloignée. Les résultats de l'optimisation ont montré que les HGES sont réalisables et peuvent fournir un approvisionnement énergétique fiable à la région éloignée.

### V.3. Conclusion

Une première tâche de cette partie était de modéliser et de simuler un module PV à appliquer pour un BTS ou un SG dans une région éloignée - prototype au Maghreb, selon les principes fondamentaux des cellules PV, avec un modèle implémenté dans un environnement MATLAB/Simulink. Le MPP a été suivi efficacement en utilisant un modèle à diode unique avec un temps de simulation réduit grâce à une structure de simulation simplifiée et une mise en œuvre facile. Tous les paramètres sont évalués en bon accord avec les fiches techniques des fabricants, ce qui a un impact positif sur les performances de la HGES. L'étude visait également à étudier l'intégration d'un système photovoltaïque et d'une petite éolienne pour évaluer la faisabilité économique et financière dans tous les cas en termes de coût de l'énergie.

Il a été prouvé que HGES proposée est financièrement faisable avec une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre provenant de l'approvisionnement en énergie du réseau. HOMER a permis de réaliser des analyses technico-économiques, de faisabilité, d'optimisation et de sensibilité des HGES autonomes. La deuxième tâche de ce document présente une vue d'ensemble de l'état actuel de la production d'électricité dans les zones reculées du Maghreb et une augmentation possible de la demande d'électricité dans un avenir proche. Enfin, il ne faut pas oublier que tout manque d'infrastructure technologique de base aura des répercussions importantes sur le niveau de vie dans les zones rurales et éloignées au niveau régional.



## V.4. References

- [1] Chowdhury, S., G. A. Taylor, S. P. Chowdhury, A. K. Saha, and Y. H. Song. "Modelling, simulation and performance analysis of a PV array in an embedded environment." In *2007 42nd International Universities Power Engineering Conference*, pp. 781-785. IEEE, 2007; Siyoucef, Hamza, et al. "How PV systems can be cost-competitive for mobile BTS in remote areas of Algeria." *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)* 9.1 (2021): 220-227.
- [2] Beltran, Hector, Endika Bilbao, Enrique Belenguier, Ion Etxeberria-Otadui, and Pedro Rodriguez. "Evaluation of storage energy requirements for constant production in PV power plants." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 60, no. 3 (2012): 1225-1234.
- [3] Ma, Tao, Hongxing Yang, and Lin Lu. "Solar photovoltaic system modeling and performance prediction." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36 (2014): 304-315.
- [4] Bahaidarah, Haitham MS. "Experimental performance evaluation and modeling of jet impingement cooling for thermal management of photovoltaics." *Solar Energy* 135 (2016): 605-617.
- [5] Adefarati, T., and R. C. Bansal. "Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation." *Applied energy* 185 (2017): 158-171.
- [6] Yushchenko, Alisa, Andréa De Bono, Bruno Chatenoux, Martin Kumar Patel, and Nicolas Ray. "GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 (2018): 2088-2103.
- [7] Siraganyan, Karni, Amarasinghage Tharindu Dasun Perera, Jean-Louis Scartezzini, and Dasaraden Mauree. "Eco-sim: a parametric tool to evaluate the environmental and economic feasibility of decentralized energy systems." *Energies* 12, no. 5 (2019): 776.
- [8] Moe, Espen. "Does politics matter? Explaining swings in wind power installations." (2017).
- [9] Roy, Steve N. "Energy logic: a road map to reducing energy consumption in telecommunications networks." In *INTELEC 2008-2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference*, pp. 1-9. IEEE, 2008.
- [10] Koutitas, George, and P. Demestichas. "Challenges for energy efficiency in local and regional data centers." *Journal of Green Engineering* 1, no. 1 (2010): 1-32.
- [11] Hashimoto, Shigeo, Toshiaki Yachi, and Tatsuo Tani. "A new stand-alone hybrid power system with wind generator and photovoltaic modules for a radio base station." In *INTELEC 2004. 26th Annual International Telecommunications Energy Conference*, pp. 254-259. IEEE, 2004.
- [12] Ackermann, Thomas, Thibault Prevost, Vijay Vittal, Andrew J. Roscoe, Julia Matevosyan, and Nicholas Miller. "Paving the way: A future without inertia is closer than you think." *IEEE Power and Energy Magazine* 15, no. 6 (2017): 61-69.
- [13] Gielen, Dolf, Francisco Boshell, Deger Saygin, Morgan D. Bazilian, Nicholas Wagner, and Ricardo Gorini. "The role of renewable energy in the global energy transformation." *Energy Strategy Reviews* 24 (2019): 38-50.
- [14] Clauser, Christoph, and Markus Ewert. "The renewables cost challenge: Levelized cost of geothermal electric energy compared to other sources of primary energy—Review and case study." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018): 3683-3693.
- [15] Mcelroy, Michael B., and Xinyu Chen. "Wind and solar power in the united states:

- status and prospects." *CSEE Journal of power and energy systems* 3, no. 1 (2017): 1-6.
- [16] <https://www.pvsyst.com/help>
- [17] Eltawil, M. A., and Z. Zhao. "Renewable and sustainable energy reviews." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (2010): 112-129.
- [18] International Electrotechnical Commission. "Photovoltaic system performance monitoring-guidelines for measurement, data exchange and analysis." *IEC 61724* (1998).
- [19] Kumar, Nallapaneni Manoj, M. Rohit Kumar, P. Ruth Rejoice, and Mobi Mathew. "Performance analysis of 100 kWp grid connected Si-poly photovoltaic system using PVsyst simulation tool." *Energy Procedia* 117 (2017): 180-189.
- [20] Siyoucef, H., Afif, B., Kobibi, Y. I. D., Ghouali, S., Merabet, B., & Motahhir, S. (2021). Performance Analysis and Techno-Economic Optimization of Green Energy Systems for Remote Areas in the Maghreb. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 6(1), 1-12; Ghiasi, Mohammad, Sheyda Esmailnamazi, Ramin Ghiasi, and Mohammadreza Fathi. "Role of renewable energy sources in evaluating technical and economic efficiency of power quality." *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 5, no. 1 (2020): 1-13.
- [21] Kumar S (2016) Assessment of renewables for energy security and carbon mitigation in Southeast Asia: the case of Indonesia and Thailand. *Appl Energy* 163:63–70.
- [22] E. J. S. Hovenga, J. Hovel, J. Klotz, P. Robins, Case report Infrastructure for Reaching Disadvantaged Consumers: Telecommunications in Rural and Remote Nursing in Australia, *Journal of the American Medical Informatics Association* Volume 5 Number 3 May / Jun 1998.
- [23] Kumar YVP, Ravikumar B (2015) Integrating renewable energy sources to an urban building in India: challenges, opportunities, and techno-economic feasibility simulation. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 1(1):1–16. <https://doi.org/10.1007/s40866-015-0001-y>.
- [24] Iglesias JG, Bollen M (2011) Economic framework for power quality, JWG CIGRE-CIRED C4.107. *Electra* (91):91-95.
- [25] P. H. Son, L. H. Son, S. Jha, R. Kumar, J. M. Chatterjee, Governing mobile Virtual Network Operators in developing countries. *Utilities Policy*, 56 (2019) 169–180.
- [26] S. Noor, W. Yang, M. Guo, K. H. van Dam, X. Wang, Energy Demand Side Management within micro-grid networks enhanced by blockchain, *Applied Energy* 228 (2018) 1385–1398.
- [27] GR. Cranston, GP. Hammond, North and south: regional footprints on the transition pathway towards a low carbon, global economy. *Appl Energy* 2010;87:2945–51.
- [28] L. Abrahamsson, T. Schütte, S. Östlund, Use of converters for feeding of AC railways for all frequencies. *Energy Sustain Dev*, 16(3) (2012) 368–378.
- [29] S. Goel, S. M. Ali, Hybrid energy systems for off-grid remote telecom tower in Odisha, India. *Int. J. Ambient Energy*, 36(3) (2013) 116–122.
- [30] H. Li, K. Li, N. Zafetti, J. Gu, Improvement of Energy Supply Configuration for Telecommunication System in Remote Areas Based on Improved Chaotic World Cup Optimization Algorithm. *Energy* (2019) 116614.
- [31] V. C. Gungor; D. Sahin; T. Kocak; S. Ergut; C. Buccella; C. Cecati; G. P. Hancke. "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements," *in IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1) (2013) 28-42.
- [32] A. Usman, S. H. Shami, Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 19 (2013) 191–199.
- [33] P. Siano, Demand response and smart grids-A survey, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 30 (2014) 461–478.
- [34] T. Dragičević, P. Siano, S. R. Prabakaran, Future Generation 5G Wireless Networks

- for Smart Grid: A Comprehensive Review. *Energies*, 12(11) (2019) 2140.
- [35] A. A. Khan, M. H. Rehmani and M. Reisslein, "Cognitive Radio for Smart Grids: Survey of Architectures, Spectrum Sensing Mechanisms, and Networking Protocols," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1) (2016) 860–898.
- [36] P. May, H.C. Ehrlich, T. Steinke, ZIB Structure Prediction Pipeline: Composing a Complex Biological Workflow through Web Services. In: W.E. Nagel, W.V. Walter, W. Lehner, (eds.) Euro-Par 2006. LNCS, Springer, Heidelberg 4128 (2006) 1148–1158.
- [37] K. Zhou, S. Yang, Demand side management in China: The context of China's power industry reform. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 47 (2015) 954–965.
- [38] K. Kusakana, H. J. Vermaak, Hybrid renewable power systems for mobile telephony base stations in developing countries. *Renewable Energy*, 51 (2013) 419–425.
- [39] W. Margaret Amutha, V. Rajini, Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 43 (2015) 553–561.
- [40] Y. Wang, Y. Huang, Y. Wang, F. Li, Y. Zhang, C. Tian, Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response. *Sustainability* 2018, 10, 847.
- [41] R. Wang, W. Gu, Z. Wu, Economic and optimal operation of a combined heat and power micro-grid with renewable energy resources. *Autom. Electr. Power Syst.* 2011, 35, 22–27.
- [42] M. Sanjida, N. Khandoker, M. Haider, S. Mustansir, Feasibility study of solar PV arrays in grid connected cellular BTS sites, International conference on advances in power conversion and energy technologies (APCET), (Book chapter) book e-ISBN : 978-1-4673-2043-6 , 978-1-4673-2041-2 (2012).
- [43] Razmjoo, A.A., Davarpanah, A. & zargarian, A. The Role of Renewable Energy to Achieve Energy Sustainability in Iran. An Economic and Technical Analysis of the Hybrid Power System. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 4, 7 (2019).  
<https://doi.org/10.1007/s40866-019-0063-3>.
- [44] Kaluthantrige A., Rajapakse A. D. , Lamothe C. & Mosallat F. Optimal Sizing and Performance Evaluation of a Hybrid Renewable Energy System for an Off-Grid Power System in Northern Canada. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 4, 4 (2019).  
<https://doi.org/10.1007/s40866-019-0061-5>.
- [45] Arefin, S.S., Das, N. Optimized Hybrid Wind-Diesel Energy System with Feasibility Analysis. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 2, 9 (2017).  
<https://doi.org/10.1007/s40866-017-0025-6>.
- [46] Tazay, A. "Techno-Economic Feasibility Analysis of a Hybrid Renewable Energy Supply Options for University Buildings in Saudi Arabia" *Open Engineering*, 11, 1 (2021) 39-55. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0005>.
- [47] Li, C., Zhou, D., Wang, H., Lu, Y., & Li, D. (2019). *Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China. Energy*, 116702. doi:10.1016/j.energy.2019.116702.
- [48] Montazeri, M.M., Najjartabar-Bisheh, M. Optimizing Technology Selection for Power Smart Grid Systems: a Case Study of Iran Power Distribution Industry (IPDI). *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 2, 6 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40866-017-0021-x>.
- [49] Welsch, M., Howells, M., Bazilian, M., DeCarolis, J. F., Hermann, S., & Rogner, H. H. (2012). *Modelling elements of Smart Grids – Enhancing the OSeMOSYS (Open Source Energy Modelling System) code. Energy*, 46(1), 337–350. doi:10.1016/j.energy.2012.08.017.
- [50] <https://earth.google.com/>
- [51] <https://www.ncdc.noaa.gov/> and <https://weatherspark.com/>
- [52] Olatomiwa L., Mekhilef S., Huda A. S. N. and Sanusi K., Techno-economic analysis of hybrid PV–diesel–battery and PV–wind–diesel–battery power systems for mobile BTS: the

- way forward for rural development, *Energy Science and Engineering* 3(4) (2015) 271–285.
- [53] S. Hashimoto, T. Yachi, T. Tani, A new standalone hybrid power system with wind generator and photovoltaic modules for a radio base station, In *Telecommunications Energy Conference, INTELEC* (2004).
- [54] G. Koutitas, P. Demestichas, A review of energy efficiency in telecommunication networks. *Telfor J.* 2 (2010) 2–7.
- [55] S. N. Roy, Energy logic: a road map to reducing energy consumption in telecommunications networks. in *Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2008. IEEE 30th International. IEEE* (2008).
- [56] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrami, Study of a solar PV–diesel–battery hybrid power system for a remotely located population near Rafha. Saudi Arabia. *Energy* 35 (2010) 4986–4995.
- [57] M. Adaramola, O. Oyewola S. Paul, Technical and economic assessment of hybrid energy systems in South-West Nigeria. *Energy Explor. Exploit.*, 30 (2012) 533–552.
- [58] P. Nema, R. K. Nema, S. Rangnekar, A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: a review. *Renew. Sustainable Energy Rev.*, 13 (2009) 209–2103.
- [59] D. Neves, C. A. Silva, S. Connors, Design and implementation of hybrid renewable energy systems on micro-communities: a review on case studies. *Renew. Sustainable Energy Rev.*, 31 (2014) 935–946.
- [60] S. K. Nandi H. R. Ghosh, Prospect of wind– PV-battery hybrid power system as an alternative to grid extension in Bangladesh. *Energy*, 35 (2010) 3040–3047.
- [61] M. Ahmed, M. Abdelrahem, R. Kennel, Highly Efficient and Robust Grid Connected Photovoltaic System Based Model Predictive Control with Kalman Filtering Capability, *Sustainability* 2020, 12, 4542.
- [62] S. Lekhchine, T. Bahi, I. Abadlia, H. Bouzeria, PV-battery energy storage system operating of asynchronous motor driven by using fuzzy sliding mode control. *Int. J. Hydrogen Energy* 42 (2017) 8756–8764.
- [63] M.A. Elgendy, B. Zahawi, D.J. Atkinson, Comparison of directly connected and constant voltage controlled photovoltaic pumping systems. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2010, 1, 184–192.
- [64] N. Vordos, D. Bandekas, J. Nolan, J. Fantidis, A. Ioannou, Design and simulation of hybrid power system with wind turbines, photovoltaics and fuel cells. In *Recent Advances in Energy, Environment and Development; WSEAS Press: Rhodes Island, Greece, 16–19 July 2013; pp. 19–24.*
- [65] M. Shayestegan, Overview of grid-connected two-stage transformer-less inverter design. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2018, 6, 642655.
- [66] Martin Calasan, Shady H.E. Abdel Aleem Ahmed F. Zobaa. A new approach for parameters estimation of double and triple diode models of photovoltaic cells based on iterative Lambert W function, *Solar Energy* Volume 218, April 2021, Pages 392-412.
- [67] S. Messalti, A. Harrag, A. Loukriz, A new variable step size neural networks MPPT controller: Review, simulation and hardware implementation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 68, 221–233.
- [68] E.I. Batzelis, G.E. Kampitsis, S.A. Papathanassiou, S. N. Manias, “Direct MPP calculation in terms of the single-diode PV model parameters,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, 30(1) (2015) 226–236.
- [69] M. Suthar, G. K. Singh and R. P. Saini, "Comparison of mathematical models of photo-voltaic (PV) module and effect of various parameters on its performance," 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, Nagercoil, (2013) 1354–1359.

- [70] Chih-Hao Chang, Jia-Jun Zhu and Huan-Liang Tsai, "Model-Based Performance Diagnosis for PV Systems," SICE Annual Conference 2010, 2139–2145, August 2010.
- [71] Sunmodule solar datasheet type: SW 250 mono/Version 2.0 and 2.5 Frame model ref: SW-02–5001US 07–2012.
- [72] K. Ding, X.G. Bian, H.H. Liu, T. Peng, A MATLAB-Simulink-Based PV Module Model and Its Application Under Conditions of Nonuniform Irradiance, IEEE Transactions On Energy Conversion, VOL. 27, NO. 4, DECEMBER 2012.
- [73] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems. New York: Wiley-IEEE Press, 2004.
- [74] Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, T. Takenouchi, and M. Yoshita, Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I–V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules, IEEE Journal of Photovoltaics, VOL. 8, NO. 1, January 2018.
- [75] W. Herrmann and W. Wiesner, "Current-voltage translation procedure for PV generators in the German 1,000 roofs-programme," in Proc. Internationales Sonnenforum, Freiburg, Germany, 1996, pp. 701–705.
- [76] A. C. Kyritsis, N. P. Papanikolaou and E. C. Tatakis, "Enhanced Current Pulsation Smoothing Parallel Active Filter for single stage grid-connected AC-PV modules," 2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, 2008, 1287-1292, doi: 10.1109/EPEPEMC.2008.4635446.
- [77] Kyritsis A.Ch., Tatakis E.C., Papanikolaou N.P., "Optimum Design of the Current Source Flyback Inverter for Decentralized Grid-Connected Photovoltaic Systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, 23(1) (2008) 281-293.
- [78] G.H. Tan, J.Z. Wang and Y.C. Ji : "Soft-switching flyback inverter with enhanced power decoupling for photovoltaic applications", IET Electr. Power Appl., 1(2) (2007) 264-274.
- [79] S. B. Kjaer, F. Blaabjerg: "Design optimization of a single phase inverter for photovoltaic applications", in Proc. IEEE PESC'03, Accapulco (Mexico), 15-19 June, 3 (2003) 1183-1190.
- [80] T. Shimizu, K. Wada, N. Nakamura: "Flyback-type single phase utility interactive inverter with power pulsation Decoupling on the DC Input for an AC Photovoltaic Module System" IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 21, No. 5, 1264-1272, September 2006.
- [81] D. Richardson, How can agricultural extension best harness ICTs to improve rural livelihoods in developing countries, <http://departments.agri.huji.ac.il/economics/gelb-how-11.pdf>, 2011.
- [82] A. Al-Karaghoul, L. L. Kazmerski, Optimization and life-cycle cost of health clinic PV system for a rural area in southern Iraq using HOMER software. Solar Energy, 84(4) (2010) 710–714.
- [83] NREL. 2009. HOMER. Available at <http://www.homerenergy.com>.
- [84] T. Lambert, P. Gilman and P. Lilienthal, Micropower System Modeling With HOMER, Integration of Alternative Sources of Energy, by Felix A. Farret and M. Godoy Simoes, 2006 John Wiley & Sons, Inc, 379-418.
- [85] A. Shiroudi, S. R. H. Taklimi, S. A. Mousavifar, P. Taghipour, Stand-alone PV-hydrogen energy system in Taleghan-Iran using HOMER software: optimization and techno-economic analysis. Environment, Development and Sustainability, 15(5) (2013) 1389–1402.
- [86] M. H. Alsharif, Optimization design and economic analysis of energy management strategy based on photovoltaic/energy storage for heterogeneous cellular networks using the HOMER model. Solar Energy, 147 (2017) 133.
- [87] A. Marneni, A. D. Kulkarni, T. Ananthapadmanabha, Loss Reduction and Voltage Profile Improvement in a Rural Distribution Feeder Using Solar Photovoltaic Generation and Rural Distribution Feeder Optimization Using HOMER. Procedia Technology, 21 (2015)

507–513.

- [88] J. Gautam, , M. I.Ahmed, , P. Kumar, Optimization and Comparative Analysis of Solar-Biomass Hybrid Power Generation System Using Homer. 2018 International Conference on Intelligent Circuits and Systems (ICICS).
- [89] R. Rawat, S. C. Kaushik, R. Lamba, A review on modeling, design methodology and size optimization of photovoltaic based water pumping, standalone and grid connected system. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 57 (2016) 1506–1519.
- [90] Y.Lu, S. Wang, K. Shan, Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings. *Applied Energy*, 155 (2015) 463–477.
- [91] T.Ma, H. Yang, L. Lu, J. Peng, Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: Modeling and techno-economic optimization. *Applied Energy*, 137 (2015) 649.
- [92] D.A.Al-falahi Monaaf, S. D. G. Jayasinghe, H. Enshaei, A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy Conversion and Management*, 143 (2017) 252–274.
- [93] M. B. M. Rozlan, et al. "The optimisation of stand-alone hybrid renewable energy systems using HOMER," *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 1802-1810, 2011.
- [94] M. Hossain, S. Mekhilef, L. Olatomiwa, Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*, 28 (2017) 358–366.
- [95] M. J.Khan, A. K. Yadav, L. Mathew, Techno economic feasibility analysis of different combinations of PV-Wind-Diesel-Battery hybrid system for telecommunication applications in different cities of Punjab, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76 (2017) 577.
- [96] C.Li, D.Zhou, H. Wang, Y. Lu, D. Li, Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China. *Energy*, (2019) 116702. doi:10.1016/j.energy.2019.116702.
- [97] S. A.Shezan, S. Julai, M. A. Kibria, K. R. Ullah, R. Saidur, W. T. Chong, R. K. Akikur, Performance analysis of an off-grid wind-PV (photovoltaic)-diesel-battery hybrid energy system feasible for remote areas. *Journal of Cleaner Production*, 125 (2016) 121–132.
- [98] S.Goel, R. Sharma, Performance evaluation of stand alone, grid connected and hybrid renewable energy systems for rural application: A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 (2017) 1378.
- [99] Small wind turbines for homes, farms and small businesses, 2011. [Online]. Available: <http://bergey.com/>.
- [100] N. M. Swarnkar and L. Gidwani, "Economic and financial assessment of integrated solar and wind energy system in Rajasthan, India," 2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Commuincation (ICCPEIC), Melmaruvathur, 2017, pp. 471-476, doi: 10.1109/ICCPEIC.2017.8290413.
- [101] Surface meteorology and solar energy. [Online]. <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [102] W. M.Amutha, V. Rajini, Cost benefit and technical analysis of rural electrification alternatives in southern India using HOMER. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62 (2016) 236.
- [103] J. Yan, Y. Yang, P. Elia Campana, City-level analysis of subsidy-free solar photovoltaic electricity price, profits and grid parity in China. *Nat Energy* 4 (2019) 709–717.
- [104] R. Sen, S. C. Bhattacharyya, Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. *Renewable Energy*, 62 (2014) 388–398.
- [105] R. Maouedj, A. Mammeri, M. D. Draou, and B. Benyoucef, Technoeconomic analysis of a Standalone hybrid Photovoltaic-wind system. Application in Electrification of a house in Adrar region, *Energy Procedia*, vol. 74 (2015) 1192–1204.

# *Conclusion Générale*

### Conclusion générale

Les principaux points qui englobent les différentes contributions de cette thèse sont présentés ici, en deux parties: la première section exploite l'outil HOMER, la deuxième profite de l'outil PVSyst. L'énergie solaire augmente de jour en jour, en gardant à l'esprit les besoins croissants, et on est amené à réaliser une alimentation solaire DC pour BTS alternative à l'utilisation des générateurs diesel. La partie première de notre thèse traite l'optimisation technoéconomique de l'alimentation d'une BTS, par HOMER, utilisant les systèmes photovoltaïques (PV) qui peuvent atténuer la pollution de l'environnement et permettre de prendre des mesures correctives, notamment dans les régions où la pollution de l'air atteint des niveaux alarmants.

Dans cette partie, nous avons optimisé un système solaire de charge DC hors réseau pour une utilisation dans les BTS de télécoms aux régions éloignées, et optimisé des systèmes (pour alimenter les BTS dans de telles régions) avec le générateur sans/avec banc de batteries.

Le principal problème lié à l'exploitation généralisée de BTS dans les zones éloignées est leur coût initial élevé, alors que la baisse rapide des prix des modules PV a amélioré leurs compétitivité par rapport aux systèmes de production d'énergie conventionnels. Une solution optimisée a été déterminée à l'aide de l'outil Homer, indiquant que le coût unitaire de l'énergie peut diminuer en réduisant la capacité PV et en augmentant la part du générateur diesel.

La deuxième partie de cette thèse a focalisé sur la modélisation des composants des systèmes PV alimentant les BTS, par le logiciel PVSyst: un outil puissant pour concevoir des systèmes PV, donnant la possibilité de modéliser avec précision n'importe quel composant du système PV par ajustement des paramètres et des caractéristiques de ce composant selon les besoins. Les technologies de production d'énergie solaire PV peuvent être utilisées pour développer des systèmes d'approvisionnement en électricité, et sont propres, rentables et fiables pour les communautés isolées notamment dans les pays en développement. Des approches pratiques, guidées par des normes d'ingénierie mondiales pertinentes, sont nécessaires pour proposer des systèmes de micro-réseaux PV adaptés à différents sites.

Les stratégies de conception de micro-réseaux et l'analyse technoéconomique présentées dans cette partie de thèse ont permis d'obtenir des résultats de valeur et d'intérêt académiques. De tels résultats peuvent être utilisés pour mieux comprendre comment planifier et développer des systèmes PV alimentant les BTS de télécoms distribuées pour des



## Conclusion Générale

---

applications hors réseau dans les régions isolées des pays en développement. Un profil de charge global d'une BTS alimentée avec 48 V-DC a été élaboré sur la base des habitudes de consommation d'énergie des utilisateurs des opérateurs de télécoms. Le statut énergétique des utilisateurs actuels et la ressource en énergie solaire disponible sont des facteurs déterminants pour comprendre le problème d'hors-réseau (Off-grid) pour alimenter la BTS et donc trouver des solutions possibles.

La connaissance de la géographie de la région éloignée où se trouve la BTS informe sur la conception et l'analyse technoéconomique proposée, plutôt que de s'appuyer entièrement sur des hypothèses. Le modèle proposé pourra renforcer la capacité locale, vu qu'il envisage la possibilité d'utiliser des modules solaires PV pour l'alimentation des BTS aux zones éloignées du réseau électrique.

Certes, la solution économique optimale pour alimenter la station BTS est un système hybride composé d'un système PV et d'un réseau électrique aux zones urbaines, mais pour les zones rurales, la solution économique optimale est le système hybride PV et générateur diesel car il permet plus en un jour nuageux.

Les résultats de PVSyst ont été utilisés pour confirmer les résultats de HOMER, et ceux des deux outils logiciels sont proches l'un de l'autre. L'utilisation de ces deux outils lors de la conception de systèmes PV est recommandée pour les concepteurs de systèmes PV en raison de l'avantage d'obtenir une conception parfaite, bien que lors du dimensionnement des composants des systèmes PV, il est recommandé aux concepteurs de prendre en compte la puissance nécessaire pour charger les batteries.

Cette étude de thèse pourra sans doute aider à modéliser un système PV complet basé sur le courant continu. La recherche que nous avons effectuée est une approche vers l'énergie renouvelable durable; Ainsi, ce sera une bonne approche vers l'énergie solaire.

Enfin, et comme perspectives (au futur), Nous devrions utiliser des sources d'énergie alternatives telles que la biomasse et l'éolien, et le système d'énergie hybride sera le plus optimum, tel que nous obtiendrons l'option multiple pour les consommations d'énergie.

Le contrôle des paramètres modélisés puis optimisés par la simulation devrait être logique afin de fournir le contrôle automatique de l'alimentation électrique, et les dispositifs de sécurité modernes doivent être améliorés pour assurer une alimentation sûre

Version originale de la revision finale de notre papier (**Siyoucef, H.**, Afif, B., Kobibi, Y. I. D., Ghouali, S., Merabet, B., & Motahhir, S. (2021). Performance Analysis and Techno-Economic Optimization of Green Energy Systems for Remote Areas in the Maghreb. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 6(1), 1-12.)

## 1 Introduction

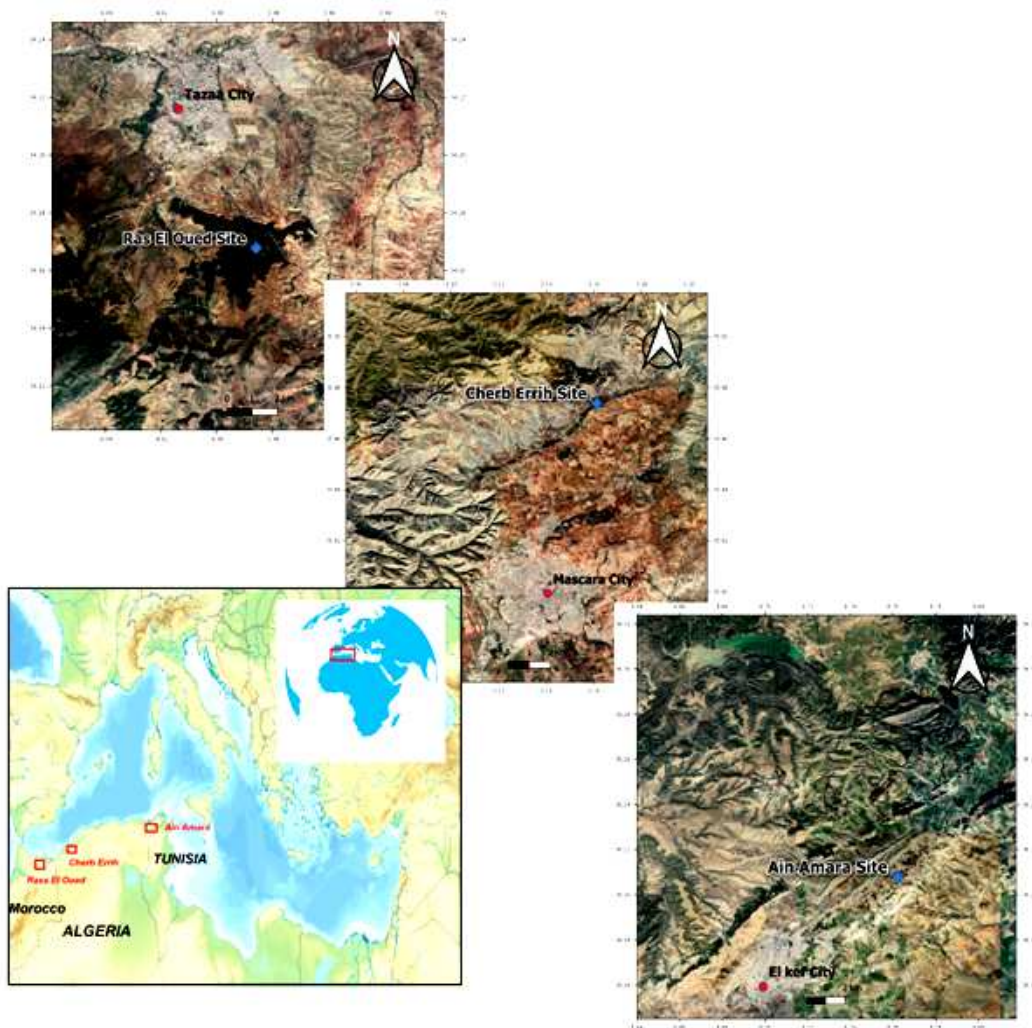
Nowadays, energy is the crucial factor impacting countries' economic development, where energy demands have been growing sharply.[1]As a result of climate change, the world is facing to energy security, and dealing with social, economic, technological, environmental, risk management, and geopolitical problems that need to be solved [2]. Developing hybrid systems for renewable energy conversion has solved most of these problems in developed countries, provision of health services, distance education, staff development/support, using information technology to deliver/enhance services to rural/remote communities, in training and education, telemedicine, to improve life quality of disadvantaged persons. [3] This was achieved thanks to adequate telecom infrastructure powered by hybrid green energy systems (HGESs) with low energy consumption and power loss. [4]

In developing countries, however, financial losses due to unbalance cost result in power losses shortening equipment life for industrial customers. [5] Manufacturing productivity suffer mostly from electricity interruptions and power quality. [4] Nevertheless, telecom networks (TNs) are required in remote areas of such countries, after that network operators have established mobile services in the emerging markets [6].Likely, smart grids (SGs) in these areas are notably important, in face of increasing energy supply-demand stress with rapid urbanization and increase in life quality [7], [8].

In remote areas, high-voltage power grids (HVPGs) feeding costly microwave and base transceiver station (BTS) equipments [9],[10],[11], or SGs monitoring energy consumption and efficiency of HVPGs using TNs, are needed [12],[13],[14],[15],[16]. However, TNs mainly expanded to highest remote forests in these areas, are confronted to their non-existence and the instability or even inadequacy of HVPGs [17], that need huge budgets to be upgraded/reformed [18]. Luckily, these eloigned regions own abundant solar and wind, so as HGESs remain an ideal choiceto power supply BTS equipments fed by HVPGs, or feed SGs controlling HVPGs consumption,hence save such costly equipments [19]. Besides major consumption issues TNs suffer from being long depended ondiesel generators (DGs), that operate expensively, at low levels of efficiency, and produce high CO<sub>2</sub> emissions [20]. Reversely, SGs involve load-, distributed- and energy storage-resources, and mainly include solar and wind HGES generation, and manageable distributed resources generation [21], so as to lower operating cost and reduce greenhouse gas and pollutant emissions [22]. Hence, it is necessary to prevent such situation harmful for both TNs and SGs. For instance, mobile operators need unremitting electrical power supply to keep TNs continuously functional, ovoid their failure by interrupting supply electricity during load-shedding periods, thus deploy

---

DGs in BTS sites as backup power supply [23]. Africa to which the Maghreb belongs, has intently suffered from a lower urbanization rate and break power supply systems, continuing to roll out 4G networks, while the globe communication industry atteststoday a stiff competition and stagnating revenue growth, to define 5G network requirements. Motivated by relevant works [24],[25],[26],[27],[28],[29],[30], in the context of lowering the energy cost and enhancing the network operation, we have chosen three (3) remote areas from the Maghreb: (Ras El Oued, Cherb Errih, and Ain Amara), owning closest location details and nearest average climate and daylight, situated at an altitude of 890m [31],[32], to be studied as a unique case study within a *remote area-prototype* (RAP), as given in Fig.1.



**Fig.1.** Geographical locations and global climate of *a*) Ras El Oued (Taza) Morocco ( $34^{\circ}10'04''N$ ,  $3^{\circ}59' 09''W$ ), *b*) Cherb Errih, Mascara, Algeria ( $35^{\circ}28'26''N$ ,  $0^{\circ}09'40''E$ ), and *c*) Ain Amara, El-Kef, Tunisia ( $36^{\circ}12'28''N$ ,  $8^{\circ}45'44''E$ ). Average wind speed, respectively: *a*) 8.3 to 7.3 mph; *b*) 8.4 to 9.5 mph; *c*) 9.6 to 8.3 mph, all windy in March and mi-November to mi-December. Low-to-High ranges of temperature in July: *a*) (20–35) $^{\circ}C$ , *b*) (19–36) $^{\circ}C$ , *c*) (16–34) $^{\circ}C$ . [31],[32]

Strong efforts have to be made by our developing countries to reduce energy costs and improve the network operation in such remote areas, optimize energy cost, convert indoor BTS into outdoor one, eliminate using air conditioners, install energy efficient equipment, and exploit HGESs to feed TNs in the mentioned RAP [33], [34],[35],[36].

## 2. Hypothesis and Goals of the Study

Besides having social costs, emigration of skilled people (mainly belonging to remote areas) from the Maghreb can prevent this region from investing in human capital. Improving rural livelihoods, beyond economic impacts, can boost agricultural industry, bring employment opportunities, hence limit emigration towards the developed world. On another hand, foreign tourists are usually getting lost in deserts and rural areas of the Maghreb. To help them safely enjoy their holidays and avoid probable critical situations, HGESs supplying BTS must be configured to localize them. This study has the following two main objectives:

It describes results of a photovoltaic (PV) cell model using Matlab-Simulink approach, and a techno-economic solution of employing hybrid HGESs to power a mobile telecom BTS in RAP, evaluated by HOMER software. Performance analysis and feasibility of a techno-economic solution is predicted, where an HGES alternative to DGs for BTS exhibit higher reliability and lower cost of energy production [37],[38],[39],[40],[41].

It aims also to answer a question: How best to harness TNs that reduce rural isolation, apply socio-technical approaches to strengthen SGs in remote areas of the Maghreb, and improve rural livelihoods? The novelty here is also that:

- Deep/high mountainous areas with insufficient rural electrification (like RAP here) may be probably targeted by tourists often lost (or attacked by malefactors), or scientists that gather information on roosting and foraging ecology of forest bats (threatening nearby agriculture) in such mountain environment.
  - Conventional energy plants in the Maghreb are prone to external economic forces, which made this region depending on such energy sources to experience unpredictable variation in electricity supply to feed TNs whose performance is affected with such handicap, and TNs have to generate electricity for properly operating by using GRESs.
  - Identifying techno economic criteria for the modeled GRES reveals wind turbines of weak contribution to supply TNs, compared to PV panels, and assessing the energy availability in SMGs of such areas are here of prime interest.
  - Rare are researches optimizing configurations of HGES models to power supply TNs, or reversibly assess energy in SGs in the whole Maghreb. From literature and gaps noticed in works recognized above, here an in-between study is performed to analyze performance and techno-economically optimize power HGESs costs for TNs in a RAP of such key-region, as gate between Europe and Africa.
  - A PV-based HRES on the basis of two objectives Matlab/Homer software is predicted to properly size and optimize performance that is estimated for optimal configurations with minimum net present cost
-

(NPC) and levelized cost of energy (LCOE). This study reveals that such HRES has reasonable environmental benefits and is economically feasible.

– Basing on comparison annual wind speed price with LCOE and NPC, the sensitivity analysis carried out here favorite PV-based RESs as promising candidates for TNs in RAP.

### 3 PV System Modeling and MPPT

PV RERs, implemented with different topologies and control methodologies, are classified into two main categories: grid and standalone connected applications [42], so as in the latter type a DC–DC converter is used between a DC load and PV sources for maximum power point tracking (MPPT) purposes [43]. In the standalone scheme, batteries as storage elements are necessary for the night hours, to solve the issue of installing a lot of panels to provide the energy that the load require [44], but these require frequent replacement [45], which increases the overall system cost [43]. Hence, a grid-connected topology is preferred, since it can be implemented by directly via coupling inverters to grids without including DC-DC converters [46]. Extensive computation requirements are disadvantaging the MPPT techniques that may be monitored by the MPPT system which choose the most appropriate one according to environmental conditions and application/load requirements. To simulate the model  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$  are needed, however, the PV system required accurate data to improve the performance of our HGES.

Here, PV cells offer lower output voltage, and the PV source is available in sixty (60) series cells panels and a single array to provide sufficient power to the BTS. Although parameters of PV cells can be estimated by using double and triple diode models [47] to describe the PV module behavior, the well known one-diode model (Fig. 2) is adopted here [48], so that:

$$I_{Out} = I_{PV} - I_S \left[ \exp \left( \frac{q(V_{Out} + I_{Out}R_S)}{kT_{Cell}A} - 1 \right) - (V_{Out} + I_{Out}R_S) / R_{SH} \right] \quad (1)$$

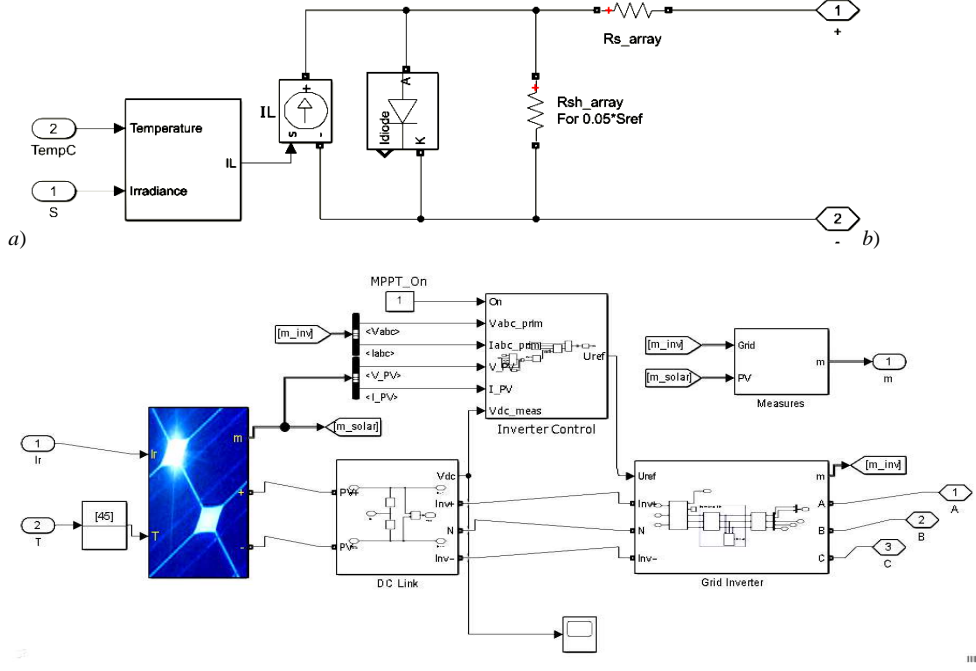


Fig. 2. PV cell one-diode equivalent circuit [49] (a) and schematic of the PV system (b) by Simulink.

Where,  $I_{PH}$ ,  $I_S$ ,  $q$ ,  $k$ ,  $T_{Cell}$ ,  $A$ ,  $R_{SH}$ , and  $R_S$  are respectively the photocurrent, dark saturation current of the cell, electron charge ( $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ ), Boltzmann's constant ( $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ), cell's working temperature, ideal factor, shunt resistance, series resistance. The photo generated current, mostly depending on solar radiation and working cell temperature, is:[50]

$$I_{PV} = [I_{SC}(T_{ref}) + K_I(T_{cell} - T_{ref})] \cdot G \quad (2)$$

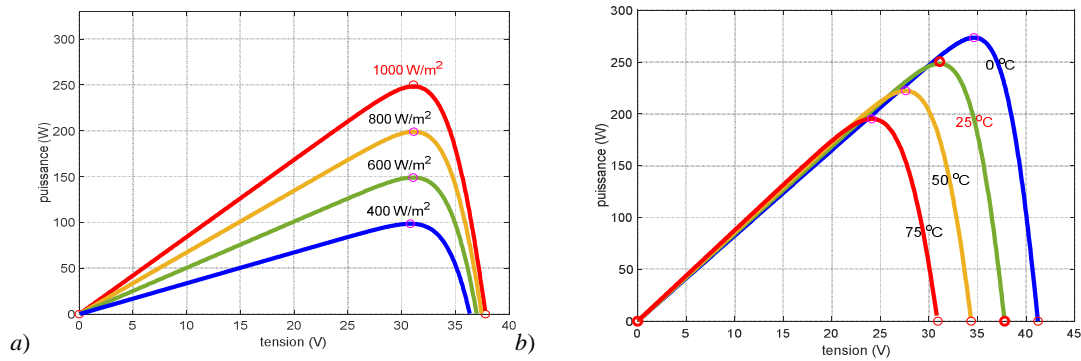
Where  $I_{SC}(T_{ref})$ ,  $G$ ,  $K_I$  and  $T_{ref}$  are respectively the short-circuit current of the cell at reference temperature ( $25^\circ\text{C}$ ) and standard radiation ( $10^3 \text{ W/m}^2$ ), the temperature coefficient of cell's short circuit current, the reference temperature of the cell, and the solar insolation ( $G$  in  $\text{kW/m}^2$ ). Additionally, the diode reverse current as a function of the cell temperature is

$$I_r = \left[ \frac{I_{SC}(T_{ref})}{e^{\left(\frac{q \cdot V_{OC}}{kA \cdot T_{ref}}\right) - 1}} \right] \cdot \left[ \frac{T_{cell}}{T_{ref}} \right]^3 \cdot e^{\left( \frac{q \cdot E_G \cdot \left( \frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{cell}} \right)}{kA} \right)} \quad (3)$$

With a first term giving the reverse saturation current. The considered PV module has  $n_s$  in series and  $n_p$  cells, and in parallel configuration, respectively (here  $n_s$  and  $n_p$  are 60 and 1), as the equation below characterizing the I-V behavior for a simplest model describes [51], basing on Eqs 2 and 3.

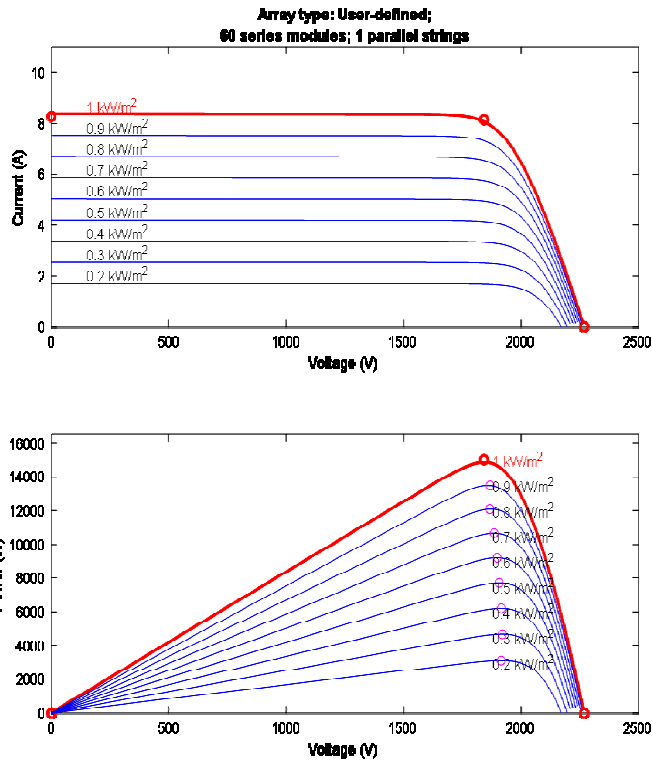
$$I_{Out} = n_p I_{PV} - n_p I_r e^{\left[ \frac{q(n_p V_{Out} + n_s I_{Out} R_s)}{n_p n_s k T_{ref} A} \right] - 1} \quad (4)$$

Where  $I_{Out}$  and  $V_{Out}$  are the output current and voltage. To observe effects of varying various parameters, a SW250 Monomodule [52], with manufacturer specifications provided in Table 1, of 250W is considered. From I-V and P-V characteristics, MPP picks are displayed regarding to power changes due to irradiation and temperature variations, and PV panel parameters at MPP are shown, such as the corresponding optimal voltage ( $V_M$ ) and current ( $I_M$ ), open circuit voltage ( $V_{OC}$ ), and short circuit current ( $I_{SC}$ ). At SC condition,  $I_{PV}$  (Eq. 2) flows through  $R_{SH}$  and  $R_S$ , since the diode does not conduct, essentially simplifying the circuit to a current divider. However, At OC condition, there is no voltage drop across the  $R_S$  and  $I_{PV}$  mainly flows through the conducting diode. It is worth mentioning that neither  $I_{sc}$  nor  $V_{oc}$  are affected by the change of  $R_s$ , and the MPP moves to the right, so as the MPP power  $P_{max}$  should be in reverse proportion to  $R_s$ , which is in accordance with the fill factor  $FF = P_{max} / (V_{oc} \cdot I_{sc})$ . Due to simplicity, Newton Raphson method [49] is used to calculate  $I_{out}$  current (Eq. 1). Figs.3–5 depict typical I-V and P-V characteristics of a single diode module model (Fig.2) under various irradianations and atmospheric conditions of temperature.

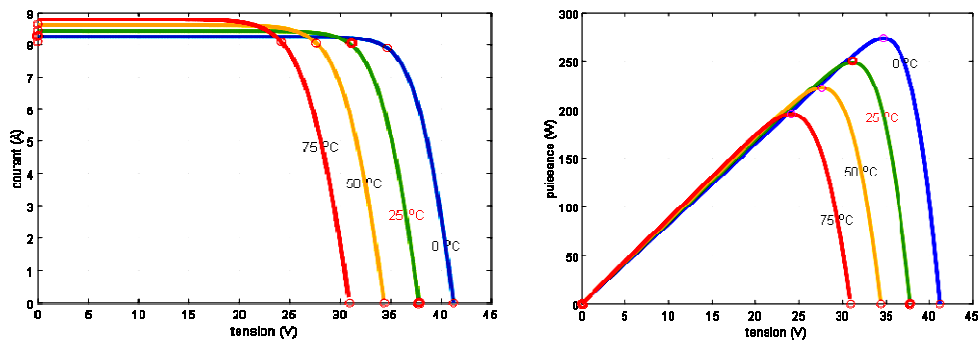


**Fig. 3.** P–V characteristics of PV modules under: *a*) different radiations and constant temperature (25 °C), *b*) temperatures and constant radiation (1000W/m<sup>2</sup>).

Figs 3 (a) shows the presented model  $I-V$  curves of the Solar World SW250 Mono at four different irradianations (400, 600, 800, and 1000 W/m<sup>2</sup>) and constant temperature (25°C), while Figs 3 (b) illustrates model  $I-V$  curves at four (4) different temperatures conditions (0, 25, 50, and 75°C) and constant irradiation (10<sup>3</sup> W/m<sup>2</sup>), indicating three key operating points:  $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$  and  $P_{MPP}$ . The results proved that simulated  $I-V$  and  $P-V$  characteristics accurately matches with those provided by fabricants, and acquiring  $I-V$  parameters from accurate discrete model with system functions is possible.



**Fig. 4.** I-V (upper panel) and P-V (lower panel) characteristics of the PV module under different radiations and constant temperature (25 °C).



**Fig. 5.** I-V (left) and P-V (right) characteristics of the PV module under different temperature conditions and constant radiation ( $G = 1000\text{W/m}^2$ ).

Matlab-Simulink calculates and analyze the output current and power of different PV module model using typical electrical parameters ( $I_{SC}$ ,  $V_{OC}$ ,  $K_f$ ) of the chosen module. With an increases of radiation, module short circuit current increases proportionally while there is an insignificant increment in the open circuit voltage (Fig.5), which leads to an increase in  $P_{max}$ , as shown in Fig.3. Contrary to an observed increase of the output voltage ( $V_{OUT}$ ) when



**Table 1.** Characteristics of Solar World SW250 Mono module.

Parameters	Specifications
Maximum Power point (MPP) ( $P_{max}$ )	250.355W
Voltage at peak power ( $V_{max}$ )	31.1V
Current at peak power ( $I_{max}$ )	8.05A
Open circuit voltage ( $V_{oc}$ )	37.8V
Short circuit current ( $I_{sc}$ )	8.28A
Temperature coefficient of Short circuit current( $K_I$ )	0.042% /°C
Ideality Factor (A)	1.3
Length x Width x Height [mm]	1675x1001x34
Number of cells	60
Cell seize [mm]	156 x 156
Cellular Material	Si-mono

the irradiation increase with increasing of temperature,  $V_{OUT}$  decreases with the p-n junction voltage temperature dependence. Hence,  $V_{OC}$  owns a negative temperature coefficient (TC) of  $-0.33\%/^{\circ}K$ , since higher temperature results in larger  $I_{PV}$ , the output current ( $I_{OUT}$ ) has a characteristic of positive TC, of  $0.042\%/^{\circ}K$  [53]. Since,  $V_{OUT}$  and  $I_{OUT}$  change with irradiance, effects of changing of temperature and irradiance should be considered in the PV module model [54]. It is worth noting that when one aims to achieve I-V and P-V characteristics at/under various temperatures and irradiances, Hermann-Wiesner method for I-V translation should be used [55]. An enhanced current pulsation smoothing parallel active filter (CPS-PAF) operation has been studied [56], in case of AC-PV module consisted of a single stage current source flyback inverter and PV module with electrical characteristics under  $10^3W/m^2$ ,  $25^{\circ}C$  and AM of 1.5:  $P_{DC}=113,6W$ ,  $V_{DC}=33.235V$ ,  $I_{DC}$  (value of PV generator current at MPP) of 3.418A,  $I_{SC}=8.28A$ ,  $V_{OC}=37.8V$  (Table 1). The inverter was selected based on high power factor regulation, very high power density, high efficiency, and simple structure [56],[57],[58],[59],[60]. Fig. 6 shows simulation waveforms of the chosen PV module output current and voltage. The results show satisfactory elimination of the low frequency PV current and voltage ripple performed by the enhanced CPS-PAF configuration [56].

---

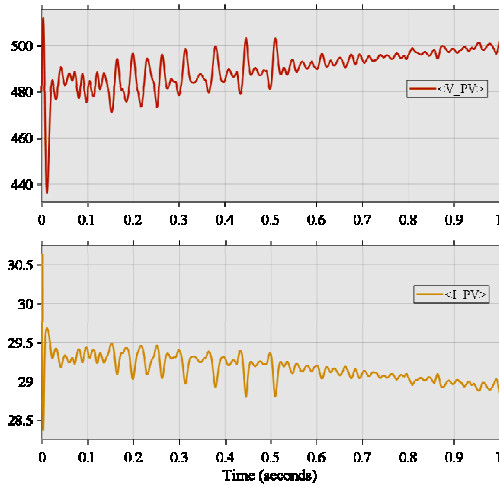


Fig. 6. Waveforms of PV Module voltage and current.

#### 4 Techno-economic Evaluation

Recognizing the extreme importance of rural areas, hub of agricultural production in areas of poverty, and within the Maghreb economies, this study tends to reduce power supply and communication costs, with an end goal of poverty reduction in the context of improved livelihoods [61]. In terms of network coverage and tremendous impact on operation cost of running systems, Maghreb countries have not fill a positive role in the growth of TNs, due the current status of electric power infrastructure [33]. Standalone PV electrification systems can play a key role in a developing RAP of the Maghreb, where sun is shining and wind is blowing during almost the whole year [62]. To determine how different renewable, and hybrid systems interact with end-use demand, and based on availability and potential of RERs in RAP, HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable [63]) software was used to model a hybrid energy system (HGES). Using Homer, Previous theoretical works on HGESs includes optimization and life-cycle cost [64],[65],[66],[67],[68], modeling, design methodology and size optimization of PV based standalone grid connected systems [69],[70],[71],[72].

Moreover, Rozlan *et al.* [73] have optimized a stand-alone HGES, and other works [74], [75],[76],[77],[78] have performed the techno economic feasibility analysis of different combinations of PV-wind hybrid systems. In terms of feasibility analysis, our system performed using HOMER

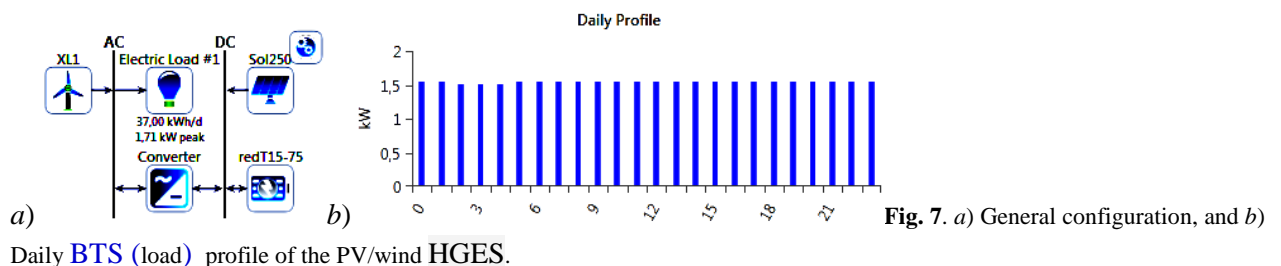


Fig. 7. a) General configuration, and b) Daily BTS (load) profile of the PV/wind HGES.

was designed to power either a BTS and/or a SG, with load total capacity found to be 37 kWh/d. To model the PV/wind HGES and decide its components

size [52],[79], a peak load of 1.71 kW is considered. HGES is calculated basing on an hourly simulation under cycle charging strategy and in load following strategy, as well. The load is supplied by the solar PV and the wind turbine supplies the load when the batteries are discharged. The schematic diagram of the HGES utilized in the present study, and the daily average load profile are shown respectively in Figs. 7 a and b. HGES components are 3kW solar PV system [52] with integration of 1 kW small wind turbine (Bergey BWC XL.1 [79]), providing a power production that depends on cut-in/cut-out speed, rotor diameter, hub height and wind speed (Fig.1) available for one from the three locations [80]. Scaled data of [81] to consider long-term annual averages, HOMER involves a clearness index from latitude and longitude of RAP.

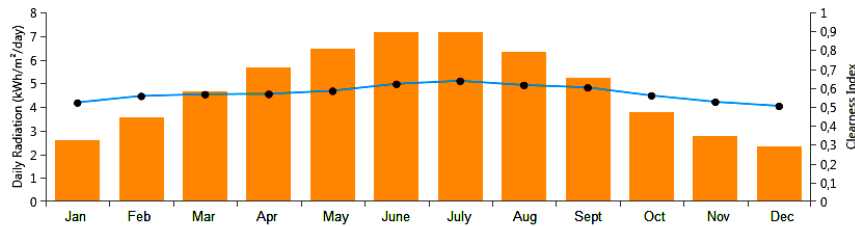


Fig. 8. Daily Solar Radiation with

Clearness Index.

Fig. 8 shows a monthly variation in solar radiation with the clearness index. These data serve as input to the HOMER for the analysis. The average daily solar radiation data with clearness index. Daily solar radiation ranges from 4.21 to 5.27 kWh/m<sup>2</sup>/day and yearly average of 4.75 kWh/m<sup>2</sup>/day. The most and least global solar irradiance is observed in July and January, respectively. Quarterly average wind speeds are respectively found to be 3.75 m/s, and ranged from 3.26 (in August) to 4.24 m/s (in December [32],[81]). Average monthly profiles of wind speed for the three locations RAP including, is given in Fig. 1. The productions of HGES components are 15.143 kWh/year (solar) and 0.849 kWh/year, with contribution percentage of 94.7% and 5.31%, respectively. AC primary load, in turn, consumes yearly 12.556 kWh/year. Monthly average electric production of RAP is shown in Fig. 9 that illustrates the total annual electricity production from the grid, wind turbine, and solar PV systems in kWh/y. Renewable energy penetration effects on the consumption from the grid can be clearly seen. At RAP, the annual electricity production from HGES is mostly due to the high output power, specifically from the PV module. To reduce energy costs and improve BST or SMG operation, HOMER optimizes the NPC of a HGES, given by:

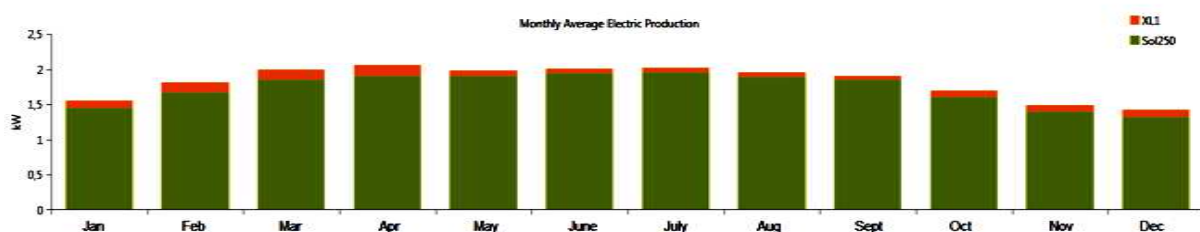


Fig. 9. RAP monthly average electric production.

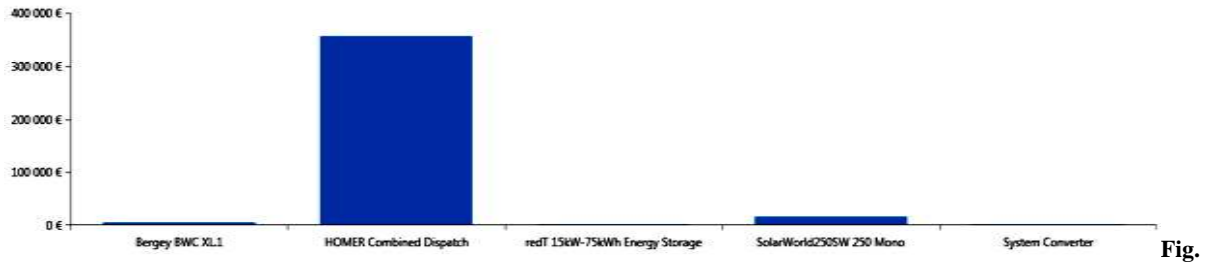
$$NPC = C_i + C_r + \sum_{t=1}^N \frac{C_o + C_f}{(1+i)^t} - C_{sv} \quad (5)$$

With  $C_o$  the operation and maintenance cost,  $C_i$ ,  $C_r$  the initial and replacement costs respectively, and  $i$  and  $N$  the discount rate and project life time respectively, and  $C_{sv}$  the salvage value, i.e. the present value of all revenues HGES earns over its lifetime, and the terms before are the present value of all costs HGES incurs over its lifetime, including fuel costs, emissions penalties, replacement costs, capital costs, *operation and maintenance (O&M)* costs, and costs of buying power from the grid [20],[82]. Since it is of interest to discuss the electricity purchasing and selling for each month during the year, HOMER simulation requires financial parameters, and costs revenues include salvage value and grid sales revenue [83]. Results of NPC and LCOE are obtained as a solution by HOMER analysis, that are refined further by performing sensitivity analysis. The main economic output, total NPC (TNPC), is calculated by summing the total discounted cash flows in each year of the project lifetime [82]. TNPC is the value by which HOMER ranks system configurations for optimization results, and the basis from which it calculates the total annualized cost and LCOE [65],[84]. In turn, the annualized cost  $AC = NPC + CRF$ , function of capital recovery factor (CRF) and TNPC, are used to analyze HGES, so as LCOE and COE are given by Eqs 6 a, b [80],[85] as follows

$$LCOE = \frac{\text{Capital} \times CRF + O\&M}{\text{Energy generated}} = \frac{\text{Capital} \times CRF + O\&M}{8760 \times \text{CapacityFactor}} \quad (6. a)$$

$$COE = TNPC \times CRF / \sum_{t=0}^{8760} E_{gen}(t) \quad (6.b)$$

Besides simulating, HOMER also optimizes based on specific parameters given as inputs so that it provide a best combination scheme resulting in a much better performance in terms of techno-economic aspects. The operating cost (OC) is the annualized value of all costs and returns other than initial capital costs. HGES options, cost of energy generation, comparing between wind/PV contribution, and impact of energy generation from renewable energy systems on the livelihood of RAP have been reported here. The TNPC, LCOE and OC are 381.355,90€, 0.9296€, and 6.280,62€, respectively. An initial capital for HGES is estimated to be 176.163 €. Fig10 shows a cost summary, where wind/PV HGES could be estimated as a most economical configuration. The cost of energy of HOMER is 0.214 €/kWh.



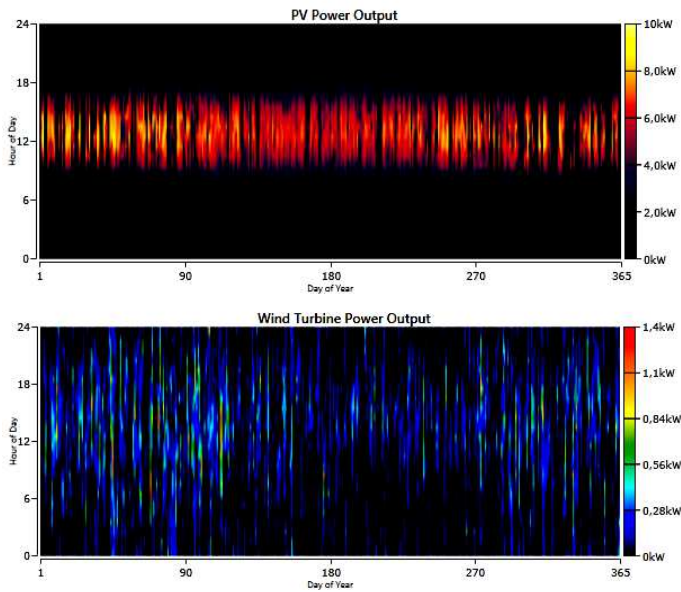
10. Cost summary of wind/PV HGES at RAP.

HGES in RAP is optimized here by considering different sensitivity parameters; Sensitivity analysis helps provide information on optimize systems for particular sensitivity variables. By varying the solar irradiation and wind speed, a sensitivity analysis was performed via simulating long-term implementation and searching components' sensitivities. Based on wind speed, solar irradiation, and grid electricity price (€/kWh) sensitivities, emissions, renewable fraction NPC, and COE are simulated. Sensitivities were set respectively over 3.5-8 kW/m<sup>2</sup>/day, 6.9-8.8 m/s and 0.084-0.336 € ranges, to analyze the feasibility of our HGES analyzed based on emission reduction and cost saving. HGES in RAP is feasible where grid electricity prices reveal to be more expensive, however global solar irradiation seem to sufficient. The results show that PV panels contribute highly than wind turbines, *i.e.* the solar energy impacts the configured HGES. As Fig. 10 shows, the cash flow summary of all components aims to a same load. It is worth noting here that cost parameters of various systems/components are based on data collected from previous published literature and assumptions. When involving PV-wind HGES, installation cost is convenient with the optimized configuration for RAP. Components' cost details are listed in Table 2, where 9.92 kW of PV arrays, one wind turbine of 1 kW, and power converter of 2.1 kW. The yearly productions are 15.143 kWh/yr (PV~94.7%), 0.849 kWh/yr (Wind ~5.31%), versus a yearly consumption of AC and DC primary load of 12.556 and 0 kWh/yr, respectively. The total rated capacities, mean outputs, capacity factors of the PV module and wind turbine respectively of (9.92;1) kW, (1.73;0.0969) kW, and (17.4;9.69)%.

Table 2. Cost parameters of components

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
Bergey BWC XL1	4 796,70 €	5 108,69 €	112,32 €	0,00 €	-4 230,30 €	5 787,41 €
HOMER Combined Dispatch	160 000,00 €	0,00 €	196 025,43 €	0,00 €	0,00 €	356 025,43 €
redT 15kW-75kWh Energy Storage	89,39 €	0,00 €	2 246,45 €	0,00 €	0,00 €	2 335,84 €
SolarWorld250SW 250 Mono	10 843,07 €	0,00 €	5 348,53 €	0,00 €	0,00 €	16 191,60 €
System Converter	433,39 €	583,28 €	235,99 €	0,00 €	-237,01 €	1 015,65 €
System	176 162,54 €	5 691,97 €	203 968,73 €	0,00 €	-4 467,31 €	381 355,93 €

Fig. 11 shows daily PV and Wind power outputs over a year. Power outputs increase with a reduction of total NPC and decrease of system's LCOE as well, showing that with a change



**Fig. 11.** Yearly PV and wind power outputs for RAP.

in sensitivity variables component capacities increase, and therefore a change in the system configuration. Hence, a PV-Wind HGES proves to be the cheapest option compared to other systems. Energy costs for a grid-connected HGES are found to be less expensive compared to DG-based supply for similar load profiles, and the wind-turbine (though of less initial capital) has less contribution than that of the PV-source to supply a BTS in RAP. The results of optimization have that HGES is feasible and can provide reliable energy supply to RAP.

## 5 Conclusion

A first task of this paper was to model and simulate a PV module to be applied for a BTS or a SG at a remote area-prototype in the Maghreb, according to PV cells fundamentals, with model implemented on a MATLAB/Simulink environment. MPP was tracked effectively using single diode model of less simulation time due to simplified simulation structure and easy implementation. All parameters are evaluated in a good agreement with manufacturers' data sheet, which impact positively the HGES's performance. The study aimed also goal to study an integration of solar PV and small wind turbine assess the economic and financial feasibility all cases in terms of cost of energy. It has been proved that the proposed HGES is financially feasible with significant reduction in emission of greenhouse gases from grid energy supply. HOMER was suitable for carrying out techno-economic, feasibility, optimization and sensitivity analyses of stand-alone HGESs. The second task of this paper presents an overview of the current status of Maghreb's power generation in remote areas and a possible increase in the demand for electricity for the near future. Finally, It is worth nothing that any lack of technological infrastructure basis will have significant impacts on standard of living in rural and remote areas at the regional levels.

## 6 References

- [1] Ghiasi, M., Esmailnamazi, S., Ghiasi, R. *et al.* Role of Renewable Energy Sources in Evaluating Technical and Economic Efficiency of Power Quality. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 5, 1 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40866-019-0073-1>.
- [2] Kumar S (2016) Assessment of renewables for energy security and carbon mitigation in Southeast Asia: the case of Indonesia and Thailand. *Appl Energy* 163:63–70. [3] E. J. S. Hovenga, J. Hovel, J. Klotz, P. Robins, Case report Infrastructure for Reaching Disadvantaged Consumers: Telecommunications in Rural and Remote Nursing in Australia, *Journal of the American Medical Informatics Association* Volume 5 Number 3 May/June 1998.
- [4] Kumar YVP, Ravikumar B (2015) Integrating renewable energy sources to an urban building in India: challenges, opportunities, and techno-economic feasibility simulation. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 1(1):1–16. <https://doi.org/10.1007/s40866-015-0001-y>
- [5] Iglesias JG, Bollen M (2011) Economic framework for power quality, JWG CIGRE-CIRED C4.107. *Electra* (91):91–95.
- [6] P. H. Son, L. H. Son, S. Jha, R. Kumar, J. M. Chatterjee, Governing mobile Virtual Network Operators in developing countries. *Utilities Policy*, 56 (2019) 169–180.
- [7] S. Noor, W. Yang, M. Guo, K. H. van Dam, X. Wang, Energy Demand Side Management within micro-grid networks enhanced by blockchain, *Applied Energy* 228 (2018) 1385–1398.
- [8] GR. Cranston, GP. Hammond, North and south: regional footprints on the transition pathway towards a low carbon, global economy. *Appl Energy* 2010;87:2945–51. [9] L. Abrahamsson, T. Schütte, S. Östlund, Use of converters for feeding of AC railways for all frequencies. *Energy Sustain Dev*, 16(3) (2012) 368–378.
- [10] S. Goel, S. M. Ali, Hybrid energy systems for off-grid remote telecom tower in Odisha, India. *Int. J. Ambient Energy*, 36(3) (2013) 116–122.
- [11] H. Li, K. Li, N. Zafetti, J. Gu, Improvement of Energy Supply Configuration for Telecommunication System in Remote Areas Based on Improved Chaotic World Cup Optimization Algorithm. *Energy* (2019) 116614.
- [12] V. C. Gungor; D. Sahin; T. Kocak; S. Ergut; C. Buccella; C. Cecati; G. P. Hancke. "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1) (2013) 28–42. [13] A. Usman, S. H. Shami, Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 19 (2013) 191–199. [14] P. Siano, Demand response and smart grids-A survey, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 30 (2014) 461–478 [15] T. Dragičević, P. Siano, S. R. Prabakaran, Future Generation 5G Wireless Networks for Smart Grid: A Comprehensive Review. *Energies*, 12(11) (2019) 2140. [16] A. A. Khan, M. H. Rehmani and M. Reisslein, "Cognitive Radio for Smart Grids: Survey of Architectures, Spectrum Sensing Mechanisms, and Networking Protocols," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1) (2016) 860–898. [17] P. May, H. C. Ehrlich, T. Steinke, ZIB Structure Prediction Pipeline: Composing a Complex Biological Workflow through Web Services. In: W. E. Nagel, W. V. Walter, W. Lehner, (eds.) *Euro-Par 2006*. LNCS, Springer, Heidelberg 4128 (2006) 1148–1158.
- [18] K. Zhou, S. Yang, Demand side management in China: The context of China's power industry reform. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 47 (2015) 954–965.
- [19] K. Kusakana, H. J. Vermaak, Hybrid renewable power systems for mobile telephony base stations in developing countries. *Renewable Energy*, 51 (2013) 419–425. [20] W. Margaret Amutha, V. Rajini, Techno-economic evaluation of various hybrid power systems for rural telecom. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 43 (2015) 553–561.
- [21] Y. Wang, Y. Huang, Y. Wang, F. Li, Y. Zhang, C. Tian, Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response. *Sustainability* 2018, 10, 847. [22] R. Wang, W. Gu, Z. Wu, Economic and optimal operation of a combined heat and power micro-grid with renewable energy resources. *Autom. Electr. Power Syst.* 2011, 35, 22–27. [23] M. Sanjida, N. Khandoker, M. Haider, S. Mustansir, Feasibility study of solar PV arrays in grid connected cellular BTS sites, *International conference on advances in power conversion and energy technologies (APCET)*, (Book chapter) book e-ISBN : 978-1-4673-2043-6 , 978-1-4673-2041-2 (2012). [24] Razmjoo, A.A., Davarpanah, A. & Zargarian, A. The Role of Renewable Energy to Achieve Energy Sustainability in Iran. An Economic and Technical Analysis of the Hybrid Power System. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 4, 7 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40866-019-0063-3>. [25] Kaluthanthrige A., Rajapakse A. D. , Lamothe C. & Mosallat F. Optimal Sizing and Performance Evaluation of a Hybrid Renewable Energy System for an Off-Grid Power System in Northern Canada. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 4, 4 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40866-019-0061-5>. [26] Arefin, S.S., Das, N. Optimized Hybrid Wind-Diesel Energy System with Feasibility Analysis. *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 2, 9 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40866-017-0025-6>. [27] Tazay, A. "Techno-Economic Feasibility Analysis of a Hybrid Renewable Energy Supply Options for University Buildings in Saudi Arabia" *Open Engineering*,

- 11, 1 (2021) 39-55. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0005>[28]Li, C., Zhou, D., Wang, H., Lu, Y., & Li, D. (2019). *Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China*. *Energy*, 116702. doi:10.1016/j.energy.2019.116702.
- [29]Montazeri, M.M., Najjartabar-Bisheh, M. Optimizing Technology Selection for Power Smart Grid Systems: a Case Study of Iran Power Distribution Industry (IPDI). *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* 2, 6 (2017). <https://doi.org/10.1007/s40866-017-0021-x>.
- [30]Welsch, M., Howells, M., Bazilian, M., DeCarolis, J. F., Hermann, S., & Rogner, H. H. (2012). *Modelling elements of Smart Grids – Enhancing the OSeMOSYS (Open Source Energy Modelling System) code*. *Energy*, 46(1), 337–350. doi:10.1016/j.energy.2012.08.017.
- [31] <https://earth.google.com/>
- [32] <https://www.ncdc.noaa.gov/> and <https://weatherspark.com/>
- [33] Olatomiwa L., Mekhilef S., Huda A. S. N. and Sanusi K., Techno-economic analysis of hybrid PV–diesel–battery and PV–wind–diesel–battery power systems for mobile BTS: the way forward for rural development, *Energy Science and Engineering* 3(4) (2015) 271–285. [34] S. Hashimoto, T. Yachi, T. Tani, A new standalone hybrid power system with wind generator and photovoltaic modules for a radio base station, In *Telecommunications Energy Conference, INTELEC* (2004). [35] G. Koutitas, P. Demestichas, A review of energy efficiency in telecommunication networks. *Telfor J. 2* (2010) 2–7. [36] S. N. Roy, Energy logic: a road map to reducing energy consumption in telecommunications networks. in *Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2008. IEEE 30th International. IEEE* (2008). [37] S. Rehman, L. M. Al-Hadhrani, Study of a solar PV–diesel–battery hybrid power system for a remotely located population near Rafha. *Saudi Arabia. Energy* 35 (2010) 4986–4995. [38] M. Adaramola, O. Oyewola S. Paul, Technical and economic assessment of hybrid energy systems in South-West Nigeria. *Energy Explor. Exploit.*, 30 (2012) 533–552. [39] P. Nema, R. K. Nema, S. Rangnekar, A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: a review. *Renew. Sustainable Energy Rev.*, 13 (2009) 209–2103.
- [40] D. Neves, C. A. Silva, S. Connors, Design and implementation of hybrid renewable energy systems on micro-communities: a review on case studies. *Renew. Sustainable Energy Rev.*, 31 (2014) 935–946. [41] S. K. Nandi H. R. Ghosh, Prospect of wind–PV-battery hybrid power system as an alternative to grid extension in Bangladesh. *Energy*, 35 (2010) 3040–3047.
- [42] M. Ahmed, M. Abdelrahman, R. Kennel, Highly Efficient and Robust Grid Connected Photovoltaic System Based Model Predictive Control with Kalman Filtering Capability, *Sustainability* 2020, 12, 4542.[43] S. Lekhchine, T. Bahi, I. Abadlia, H. Bouzeria, PV-battery energy storage system operating of asynchronous motor driven by using fuzzy sliding mode control. *Int. J. Hydrogen Energy* 42 (2017) 8756–8764. [44] M.A. Elgendy, B. Zahawi, D.J. Atkinson, Comparison of directly connected and constant voltage controlled photovoltaic pumping systems. *IEEE Trans. Sustain. Energy* 2010, 1, 184–192. [45] N. Vordos, D. Bandekas, J. Nolan, J. Fantidis, A. Ioannou, Design and simulation of hybrid power system with wind turbines, photovoltaics and fuel cells. In *Recent Advances in Energy, Environment and Development; WSEAS Press: Rhodes Island, Greece, 16–19 July 2013; pp. 19–24*. [46] M. Shayestegan, Overview of grid-connected two-stage transformer-less inverter design. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy* 2018, 6, 642655.
- [47] Martin Čalasan, Shady H.E. Abdel Aleem Ahmed F. Zobaa. A new approach for parameters estimation of double and triple diode models of photovoltaic cells based on iterative Lambert W function, *Solar Energy* Volume 218, April 2021, Pages 392-412.
- [48] S. Messalti, A. Harrag, A. Loukriz, A new variable step size neural networks MPPT controller: Review, simulation and hardware implementation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 68, 221–233.
- [49] E.I. Batzelis, G.E. Kampitsis, S.A. Papathanassiou, S. N. Manias, “Direct MPP calculation in terms of the single-diode PV model parameters,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, 30(1) (2015) 226–236. [50] M. Suthar, G. K. Singh and R. P. Saini, "Comparison of mathematical models of photo-voltaic (PV) module and effect of various parameters on its performance," *2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, Nagercoil, (2013) 1354–1359.
- [51] Chih-Hao Chang, Jia-Jun Zhu and Huan-Liang Tsai, “Model-Based Performance Diagnosis for PV Systems,” *SICE Annual Conference 2010*, 2139–2145, August 2010.[52] Sunmodule solar datasheet type: SW 250 mono/Version 2.0 and 2.5 Frame model ref: SW-02–5001US 07–2012.[53] K. Ding, X.G. Bian, H.H. Liu, T. Peng, A MATLAB-Simulink-Based PV Module Model and Its Application Under Conditions of Nonuniform Irradiance, *IEEE Transactions On Energy Conversion*, VOL. 27, NO. 4, DECEMBER 2012. [54] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. New York: Wiley-IEEE Press, 2004.[55] Y. Hishikawa, T. Doi, M. Higa, K. Yamagoe, H. Ohshima, T. Takenouchi, and M. Yoshita, Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I–V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules, *IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS*, VOL. 8, NO. 1, JANUARY 2018. W. Herrmann and W. Wiesner, “Current-voltage translation procedure for PV generators in the German 1,000 roofs-programme,” in *Proc. Internationales Sonnenforum, Freiburg, Germany, 1996*, pp. 701–705.[56] A. C. Kyritsis, N. P. Papanikolaou and E. C. Tatakis, "Enhanced Current Pulsation Smoothing Parallel Active Filter for single stage grid-connected AC-PV modules," *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, Poznan, 2008*, 1287-1292, doi: 10.1109/EPEPMC.2008.4635446. [57] Kyritsis A.Ch., Tatakis E.C., Papanikolaou N.P., “Optimum Design of the Current Source Flyback Inverter for Decentralized Grid-Connected Photovoltaic Systems”, *IEEE*



- Transactions on Energy Conversion, 23(1) (2008) 281-293. [58] G.H. Tan, J.Z. Wang and Y.C. Ji : "Soft-switching flyback inverter with enhanced power decoupling for photovoltaic applications", IET Electr. Power Appl., 1(2) (2007) 264-274.
- [59] S. B. Kjaer, F. Blaabjerg: "Design optimization of a single phase inverter for photovoltaic applications", in Proc. IEEE PESC'03, Accapulco (Mexico), 15-19 June, 3 (2003) 1183-1190.
- [60] T. Shimizu, K. Wada, N. Nakamura: "Flyback-type single phase utility interactive inverter with power pulsation Decoupling on the DC Input for an AC Photovoltaic Module System" IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 21, No. 5, 1264-1272, September 2006.
- [61] D. Richardson, How can agricultural extension best harness ICTs to improve rural livelihoods in developing countries, <http://departments.agri.huji.ac.il/economics/gelb-how-11.pdf>, 2011.
- [62] A. Al-Karaghoul, L. L. Kazmerski, Optimization and life-cycle cost of health clinic PV system for a rural area in southern Iraq using HOMER software. Solar Energy, 84(4) (2010) 710-714.
- [63] NREL. 2009. HOMER. Available at <http://www.homerenergy.com>.
- [64] T. Lambert, P. Gilman and P. Lilienthal, Micropower System Modeling With HOMER, Integration of Alternative Sources of Energy, by Felix A. Farret and M. Godoy Simoes, 2006 John Wiley & Sons, Inc, 379-418, [65] A. Shiroudi, S. R. H. Taklimi, S. A. Mousavifar, P. Taghipour, Stand-alone PV-hydrogen energy system in Taleghan-Iran using HOMER software: optimization and techno-economic analysis. Environment, Development and Sustainability, 15(5) (2013) 1389-1402.
- [66] M. H. Alsharif, Optimization design and economic analysis of energy management strategy based on photovoltaic/energy storage for heterogeneous cellular networks using the HOMER model. Solar Energy, 147 (2017) 133. [67] A. Marneni, A. D. Kulkarni, T. Ananthapadmanabha, Loss Reduction and Voltage Profile Improvement in a Rural Distribution Feeder Using Solar Photovoltaic Generation and Rural Distribution Feeder Optimization Using HOMER. Procedia Technology, 21 (2015) 507-513.
- [68] J. Gautam, , M. I. Ahmed, , P. Kumar, Optimization and Comparative Analysis of Solar-Biomass Hybrid Power Generation System Using Homer. 2018 International Conference on Intelligent Circuits and Systems (ICICS).
- [69] R. Rawat, S. C. Kaushik, R. Lamba, A review on modeling, design methodology and size optimization of photovoltaic based water pumping, standalone and grid connected system. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 57 (2016) 1506-1519. [70] Y. Lu, S. Wang, K. Shan, Design optimization and optimal control of grid-connected and standalone nearly/net zero energy buildings. *Applied Energy*, 155 (2015) 463-477. [71] T. Ma, H. Yang, L. Lu, J. Peng, Pumped storage-based standalone photovoltaic power generation system: Modeling and techno-economic optimization. *Applied Energy*, 137 (2015) 649. [72] D. A. Al-falahi Monaaf, S. D. G. Jayasinghe, H. Enshaei, A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system. *Energy Conversion and Management*, 143 (2017) 252-274. [73] M. B. M. Rozlan, et al. "The optimisation of stand-alone hybrid renewable energy systems using HOMER," *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 1802-1810, 2011.
- [74] M. Hossain, S. Mekhilef, L. Olatomiwa, Performance evaluation of a stand-alone PV-wind-diesel-battery hybrid system feasible for a large resort center in South China Sea, Malaysia. *Sustainable Cities and Society*, 28 (2017) 358-366. [75] M. J. Khan, A. K. Yadav, L. Mathew, Techno economic feasibility analysis of different combinations of PV-Wind-Diesel-Battery hybrid system for telecommunication applications in different cities of Punjab, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76 (2017) 577.
- [76] C. Li, D. Zhou, H. Wang, Y. Lu, D. Li, Techno-economic performance study of stand-alone wind/diesel/battery hybrid system with different battery technologies in the cold region of China. *Energy*, (2019) 116702. doi:10.1016/j.energy.2019.116702.
- [77] S. A. Shezan, S. Julai, M. A. Kibria, K. R. Ullah, R. Saidur, W. T. Chong, R. K. Akikur, Performance analysis of an off-grid wind-PV (photovoltaic)-diesel-battery hybrid energy system feasible for remote areas. *Journal of Cleaner Production*, 125 (2016) 121-132.
- [78] S. Goel, R. Sharma, Performance evaluation of stand alone, grid connected and hybrid renewable energy systems for rural application: A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78 (2017) 1378.
- [79] Small wind turbines for homes, farms and small businesses, 2011. [Online]. Available: <http://bergey.com/>.
- [80] N. M. Swarnkar and L. Gidwani, "Economic and financial assessment of integrated solar and wind energy system in Rajasthan, India," *2017 International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)*, Melmaruvathur, 2017, pp. 471-476, doi: 10.1109/ICCPEIC.2017.8290413. [81] Surface meteorology and solar energy. [Online]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> [82] W. M. Amutha, V. Rajini, Cost benefit and technical analysis of rural electrification alternatives in southern India using HOMER. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62 (2016) 236.
- [83] J. Yan, Y. Yang, P. Elia Campana, City-level analysis of subsidy-free solar photovoltaic electricity price, profits and grid parity in China. *Nat Energy* 4 (2019) 709-717.
- [84] R. Sen, S. C. Bhattacharyya, Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER. *Renewable Energy*, 62 (2014) 388-398. [85]
- R. Maouedj, A. Mammeri, M. D. Draou, and B. Benyoucef, Technoeconomic analysis of a Standalone hybrid Photovoltaic-wind system. Application in Electrification of a house in Adrar region, *Energy Procedia*, vol. 74 (2015) 1192-1204.

Version originale de la revision finale de notre papier "Siyoucef, Hamza, Benameur Afif, Amina Benhammou, and Boualem Merabet. "How PV systems can be cost-competitive for mobile BTS in remote areas of Algeria." *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)* 9, no. 1 (2021): 220-227."

ISSN:2089-3272,DOI:10.11591/ijeel.v9i1.2576

□ 220

---

How PV systems can be cost-competitive for mobile BTS  
in remote areas of Algeria

---

Hamza Siyoucef<sup>1</sup>, Benameur Afif<sup>2</sup>, Amina Benhammou<sup>3</sup>, Boualem Merabet<sup>4,\*</sup>

---

---

## Article Info

### Article history:

Received Jun 27, 2020  
Revised Mar 9, 2021  
Accepted Mar 22, 2021

---

### Keyword:

Sustainable  
energy PV systems  
Third  
keyword PVSY  
ST  
Telecom BTS  
Hybrid-PV/Wind-  
Diesel Battery

---

## ABSTRACT

Solar electricity for telecommunication infrastructure has become one of the main contributors of electrical energy to the energy system in the future, but solar technology needs support to find its way to the market. Since photovoltaic (PV) electricity always involves very high costs compared to electricity from other sources, a striking question is: how can PVs achieve competitiveness? There are different strategies for promoting applied PV electricity generation around the world. Here, we simulated and designed a 40 kWp injected PV power, to evaluate the energy of the incident photon flux, produced by PV panels and that injected into the electricity grid, and then judge whether the installation is profitable and the technology chosen is economical. The results reveal that the site of Tamanrasset (extreme south of Algeria) could produce an annual energy production of 73863 kWh, justifying why the German Academy has chosen such site for the famous desert project, lastly launched between the two countries.

Copyright © 2018 Institute of Advanced Engineering and Science.  
All rights reserved.

---

### Corresponding Author:

Boualem MERABET,  
Department of Electrical and Computer Engineering, M  
ustapha Stambouli University,  
BP 763, Road of Mamounia, Mascara 29000, Algeria. Em  
ail: b.merabet@univ-mascara.dz

---

## Nomenclature

$E_{Array}$	effective energy at the output of the array (in kWh)
$E_{Grid}$	energy injected into grid (in kWh)
$CUF$	Capacity utilization factor (in %)
$Eff_{Array}$	efficiency of the array ( $Eff_{ic} \cdot E_{out array} / \text{rough area}$ ) (in %)
$Eff_{SysR}$	efficiency of the system ( $Eff_{ic} \cdot E_{out system} / \text{rough area}$ ) (in %)
$Glob_{Inc}$	global incident in collector plane (in kWh/m <sup>2</sup> )
$Glob_{Hor}$	horizontal global irradiation (in kWh/m <sup>2</sup> )
$Glob_{Eff}$	effective global, correction for IAM shadings (in kWh/m <sup>2</sup> )
$L_c$	capture losses (in kWh/kWp/day)
$L_s$	system losses (in kWh/kWp/day)
$PV$	photovoltaic(s)
$Si-Poly$	silicon poly-crystalline
$T_{Amb}$	ambient temperature (in °C)
$Y_f$	Produced useful energy (inverter output in kWh/kWp/day)

## 1. INTRODUCTION

Generating electric power uses mainly fossil and fissile fuels (FFs), and systematic use of these latter, such as oil, coal or natural gas allows for low production costs, and leads to a massive release of polluting gases and green-house gases [1]. 40% of global carbon (CO<sub>2</sub>) emissions originate from FF-based electricity generation, and nuclear energy, which does not emit directly from CO<sub>2</sub>, and generally suffers from a bad media image because of the significant risks involved [2]–[4]. Despite the fact risks of accidents related to their operation are very low, the consequences of an accident would be disastrous, and the treatment of waste from this production method is very costly [5],[6]. Even

though many countries (like Algeria) have today surplus in electricity production, the future is not for FF resources, with reserves constantly diminishing and prices fluctuate enormously depending on the economic situation. In the field of information for example, telecom networks (TNs) have expanded to remote areas of the country (like peaks, forests and deserts) and demand for connectivity is growing. TNs are confronted with their non-existence in these regions and/or the instability of the power grids (their energy sources). Diesel generators, on which telecom companies have long relied in these regions, operate at a low level of efficiency, have become more expensive to operate and produce high CO<sub>2</sub> emissions [7]. Moreover, climate changes today imminently threaten the prosperity that mankind enjoy, so as we should protect ecosystems and safeguard biodiversity [8]. Hard efforts have been made in Algeria to optimize energy cost by converting indoor base transceiver station (BTS) into outdoor one to eliminate the use of air conditioner [9], installing energy efficient equipment [10] and the use of green energy sources to power telecom sites [11]. Also, the increased deployment of renewable energies (REs), especially solar photovoltaics (PV), that has reached historic levels, so as hydropower, biomass for power geothermal and onshore wind can all now provide electricity competitively compared to FF-fired power generation where good resources and cost structures exist [12-14]. Now, attributed renewable energy power capacity have record new additions that can be to rapidly falling costs and competitiveness, particularly for solar PV and wind power [15]. In this work, we aim to focus on the most competitive utility-scale solar PV projects in two (2) distinguished sites : Tamanrasset (blessed with abundant radiation with clear sky) in the Algerian south, and Tunis (north of Tunisia), in terms of ability and cost. Our goal here is to configure a PV-based system supplying BTS in order to avoid foreign tourists getting lost in the huge desert of Tamanrasset and help them enjoy their holy days. We have used PVsyst software [16], to determine systems behavior according to databases at different geographical sites, as well as technical parameters of different components. A plethora of works have been devoted to the performance and feasibility analysis of PV-based generation systems. For instance, V. Sharma et al. [17] carried out the performance analysis of a 190 kWp solar PV power plant (Khatkar-Kalan, India) and found that the final yield, reference yield and performance ratio vary respectively in the ranges 1.45–2.84 kWh/kWp-day, 2.29–3.53 kWh/kWp-day and 55–83%. Irwanto et al. [18] analysed the performance of PV output power, and reported an efficiency of PV under/without cooling system respectively to be 14% and 10.3%, and an efficiency of PV module of 13.05% and 10.45% for incident irradiances of 1000 W/m<sup>2</sup> and 200 W/m<sup>2</sup>, respectively. B. Shiva Kumara et al. [19] reported a final yield of the plant ranged from 1.96 to 5.07 h/d, and an annual performance ratio of 86.12%, and that the plant has 17.68% CUF

with annual energy generation of 15798.192 MWh/Year. Allouhi et al. [20] carried out a performance analysis and economical/environmental assessment of two grid-connected PV systems (in Meknes, Morocco) and found a levelized cost of electricity (LCOE) and a payback time in the ranges 0.073–0.082 \$/kWh and 10–12.69 years, respectively.

---

Malvoni et al. [21] investigated the performance of a 960 kW PV system (southern Italy), and reported that the performance ratio, capacity factor, yearly average module efficiency, system efficiency, capture and system losses were found to be 84.4%, 15.6%, 15.3%, 14.9%, and 0.6 h/day and 0.1 h/day, respectively. Pillai et al. [22] studied a 1 MW PV grid connected system (in Bahrain) and reported an LCOE of 0.0423 \$/kWh (16 fils/kWh) that is 43% less than the present actual cost of a kWh of generation. M.R. Akhtari et al. [23] adopted an innovative method to recover surplus electricity to generate heat and cut emissions, and reported that recovering extra electricity enhance renewable fraction by up to 35% and bring down cost of energy and exhausted CO<sub>2</sub> by 7.1 and 10.6%, respectively. Thotakura et al. [24] presented the performance of a megawatt-scale grid-connected rooftop solar photovoltaic (PV) plant installed on the building rooftops of an educational institute (Andhra Pradesh, India), reported a solar PV plant supplied energy of 1325.42 MWh to the grid during the monitored period, an average mean bias error of 30.64%, and average normalized mean bias error of 22.75%. Goel et al. [25] carried out performance of a 1.2 kW grid-connected rooftop solar PV system (in Bhubaneswar, India), and found an annual energy with Meteorology-derived data of 9.2% and 14.75% higher than the measured value.

PVSyst software used here offers three PV system levels, corresponding to different stages of developing a real project. The rest of the paper is organized as follows: Section 2 lists the research method used to evaluate the performance of system, which is available for supplying TNs, as found in the literature. Particular emphasis is given to the assessment that is found to be used in reality at a great extent as a convenient approach. In Section 3 one of the main alternative solutions to feed mobile BTS in remote areas is discussed with special focus on the impact of PV system sizing fed into the grid, production evaluation of the system when injected into grid energy, and economic estimation. Section 4 concludes the paper.

## **RESEARCH METHOD**

In this part, we aim at identifying the tool on which our investigation is based, and assessing data to analyze the performance of the system that will feed mobile BTS in remote areas. The system designed to feed a BTS in Tamanrasset area consists of a PV based RE as a power source, where PV

---

system coordinates, measures and accesses a PV-based system. Once area and load are characterized, BTS technicians may choose constituents from an item database to compute the measure for each constituent.

### PVSYSTEMS Software

The performance of our system is based on a simulation studied by PVSYS, that establishes an overall performance of the standalone PV system and generates the resources data for the whole year. The output of our system is discussed via simulation tools like the potential energy resources, component sizing, energy production from a standalone PV system, and system losses. Global radiation and temperature are key-parameters to ensure running simulation, so that the installation solar benefits depend strongly on the yearly sunlight intensity. The simulated model, technically sized as per the project specifications, using PVsyst simulation tool, consists of PV modules, inverters and grid interface network [16].

### Assessment and Analysis

The ideal allocation of Tamanrasset (As shown in Fig. 1) exhibits the highest annual global solar radiation (Fig. 2) of  $270 \text{ W/m}^2$ , followed by Tunis:  $206.4 \text{ W/m}^2$ . Tamanrasset coordinates are  $22^\circ 47' 20'' \text{ N}$  and  $5^\circ 31' 32'' \text{ E}$ . It is located at an altitude of 1.320 m, where very high temperatures of over  $47^\circ \text{ C}$  have been recorded. The inclination angles of the panels necessary for sun to fall on the periods of time and consequently give optimal field production, allowing us to take maximum advantages of the sunlight during the day. Here, a comparative performance study of grid-tied PV-based systems in Tamanrasset and Tunis sites

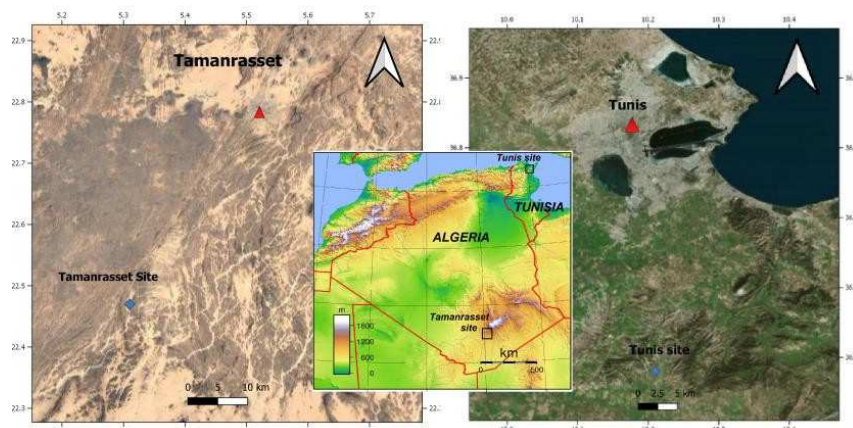


Figure1.SiteLocationsofTamanrassetandTunis.

usingPVsystispresented.Theinclination anglesofthe inclined planesofthe twositesare setat  $23^{\circ}$ and $30^{\circ}$ ,respectively.

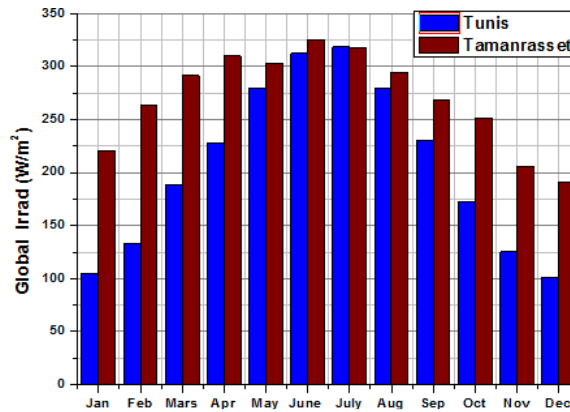


Figure2.Annualglobalsolarradiationinbothareas.

Since both countries are in the northern hemisphere, a best mode to direct PV panels is to the south because solar cells are to be facing the path of sun, to obtain a highest solar radiation and much better power production of PV panels.

## RESULTS AND ANALYSIS

The studied system involves mobile BTS in remote areas from six countries (mainly two among them for comparison), and focuses on managing electricity supply/demand, and integrating decentralized energy resources in TNs. Using PVSyst, at variance to sizing apparatus, components' kind and size are stated. It supplies an illustrative analysis of the system, picks loads and solar power data, and models PV and electrical components of various sizes to correspond to a request.



## PVsystem Sizing fed into the grid

**Global System configuration**

1 Number of kinds of sub-fields

Simplified Schema

**Global system summary**

Nb. of modules	180	Nominal PV Power	39.6 kWp
Module area	349 m <sup>2</sup>	Maximum PV Power	40.1 kWdc
Nb. of inverters	12	Nominal AC Power	36.0 kWac

---

**Homogeneous System**

**Presizing Help**

No Sizing    Enter planned power  kWp, ... or available area  m<sup>2</sup>

**Select the PV module**

Sort modules:  Power     Technology     Manufacturer    All modules

220 Wp 29V    Si-poly    WXS220S    Zhejiang Wanxiang    Photon Maq. 20C   

Approx. needed modules: **182**    Sizing voltages:    V<sub>mpp</sub> (60°C) **29.4 V**  
V<sub>oc</sub> (-10°C) **49.0 V**

**Select the inverter**

Sort inverters by:  Power     Voltage (max)     Manufacturer    All inverters

3.0 kW    125 - 600 V    50 Hz    Sunny Boy SB 3300 TL HC    SMA   

Nb. of inverters:      Operating Voltage: **125-600 V**    Global Inverter's power: **36.0 kWac**  
Input maximum voltage: **750 V**

**Design the array**

**Number of modules and strings**

Mod. in series:  should be between 5 and 15

Nbre strings:  between 11 and 12

Overload loss: **0.1 %**

Phom ratio: **1.10**

**Nb. modules: 180    Area: 349 m<sup>2</sup>**

**Operating conditions**

V <sub>mpp</sub> (60°C)	441 V
V <sub>mpp</sub> (20°C)	530 V
V <sub>oc</sub> (-10°C)	735 V

Plane irradiance: **1000 W/m<sup>2</sup>**     Max. in data     STC

Imp (STC)	76.2 A	Max. operating power	<b>35.3 kW</b>
Isc (STC)	84.7 A	at 1000 W/m <sup>2</sup> and 50°C	
Isc (at STC)	83.6 A	<b>Array nom. Power (STC)</b>	<b>39.6 kWp</b>

Figure 3. Dimensioning grid-connected PV systems for both sites.

The PV system sizing, taking into account the technical parameters of the modules a converter, is shown in Fig. 3. As mentioned above, a PV generator fed into the grid has been considered, without batteries, to supply a village of 20 households, each household has a daily consumption of 2 kWh; therefore the overall power is estimated at 40 kWh. For this purpose the 29V/220W modules in Si-poly PV system, brand Zhejiang Wanxiang WXS220S, 3kW power converter with 50Hz frequency at a voltage range of 125 to 600 V, and a brand SMA referenced Sunny Boy SB 3300 TL HC, have been chosen. Such parameters are considered constant for both sites: the same power, modules, and energy converters. Beside grid lines, fuse box and utility meter, the main elements used to configure this grid-connected PV system are inverters and PV modules. These produce DC power (current and voltages) and the inverter assures the DC-to-AC conversion. The AC inverter has outputs supplied to grid boosted by an utility meter and a fuse box. An inverter (in grid connected

PV systems) operates in phase with the grid, and continuously produces a sinusoidal output. As for the grid connection, it can be made from output terminals of the inverter with the connection of an utility meter and a circuit breaker in fuse box. [26]

### Production Evaluation of the system when injected into the grid

In Table 1 (summarizing results shown below), the highest annual global solar radiation and power parameters are recorded. DC power provided by Si-poly PV arrays, injected into-grid energy, the considering losses in electrical components, PV arrays and system efficiency are also calculated here. All computed values mentioned in balances and main results were monthly and yearly obtained (temperature averages, efficiency and summation for irradiance and energy are given in average values). As shown in the summary analysis results illustrated by Table 1, a highest annual production of 73863 kWh was recorded in Tamanrasset, with a contribution of 7042 kWh given in March. We also note that the solar radiation in July is the highest at 236 kWh/m<sup>2</sup> compared to that of 217 kWh/m<sup>2</sup> in March, while the temperatures are respectively 28.4 °C and 17.4 °C, which influences the decrease in panel production and the higher collection and system losses at temperatures above 25 °C.

Table 1. Summary of monthly and annual results (Balances and main results of 39.6 kWp Si-poly PV systems) obtained for both sites: Tamanrasset (in blue) and Tunis (in red).

	<i>GlobHor</i> (kWh/m <sup>2</sup> )	<i>T<sub>Amb</sub></i> (°C)	<i>GlobInc</i> (kWh/m <sup>2</sup> )	<i>GlobEff</i> (kWh/m <sup>2</sup> )	<i>E<sub>Array</sub></i> (kWh)	<i>E<sub>Grid</sub></i> (kWh)	<i>Eff<sub>ArrR</sub></i> (%)	<i>Eff<sub>SysR</sub></i> (%)
January	164/78	11.8/13.5	219.7/117.3	214.1/114.1	7052/3881	6721/3695	9.19/9.47	8.76/9.02
February	177/89	13.8/13.3	217.8/119.1	212.3/115.6	6799/3872	6479/3672	8.94/9.31	8.52/8.83
March	217/140	17.4/13.1	238.2/168.2	231.9/163.6	7387/5449	7035/5184	8.88/9.27	8.46/8.82
April	223/164	21.8/14.7	219.3/171.3	212.9/166.1	6685/5521	6369/5249	8.73/9.23	8.32/8.77
May	225/208	25.4/18.2	204.5/198.3	198.1/192.3	6192/6263	5895/5956	8.67/9.04	8.25/8.60
June	234/225	28.1/21.7	203.5/204.3	196.7/197.7	6047/6297	5758/5990	8.51/8.82	8.10/8.39
July	236/237	28.4/25.3	209.7/220.0	202.6/212.9	6218/6586	5921/6263	8.49/8.57	8.08/8.15
August	219/208	27.9/26.5	208.3/210.3	202.0/204.1	6213/6341	5919/6038	8.54/8.63	8.13/8.22
September	193/166	25.9/26.5	201.9/190.0	196.4/184.6	6098/5754	5818/5478	8.65/8.67	8.25/8.25
October	187/128	22.3/21.9	218.6/168.9	213.1/164.4	6714/5296	6406/5047	8.79/8.98	8.39/8.56
November	148/90	18.2/17.7	188.8/137.1	183.7/133.1	5909/4401	5634/4192	8.96/9.19	8.55/8.76
December	142/75	13.8/14.80	192.7/121.8	187.4/118.4	6198/3999	5909/3808	9.21/9.41	8.78/8.95
Year	2365/180	21.27/18.89	2522.9/2026.5	2451.2/1966.9	77511/63661	73863/6057	8.80/8.99	8.38/8.56

### Normalized productions

Collection losses, system losses and produced useful energy per installed kWp/day (normalized productions) were evaluated from the simulations, as can be seen in Fig. 4. Defined by the IEC norms [27] such normalized productions are standardized variables to

acurately assess the PV system performance. TheCollection losses (PV array capture losses), system loss, and produced useful energy ( $L_c$ ,  $L_s$  and  $Y_f$ ) arerespectively 1.15 kWh/kWp/day, 0.21 kWh/kWp/day and 4.19 kWh/kWp/day for Tamanrasset, and 1.55kWh/kWp/day, 0.25 kWh/kWp/day and 5.11 kWh/kWp/day for Tunis, comparable to those of [28] (for aneducational institute, India) found to be 1.0 kWh/kWp/day, 0.1 kWh/kWp/day and 4.42 kWh/kWp/day, respectively.

---

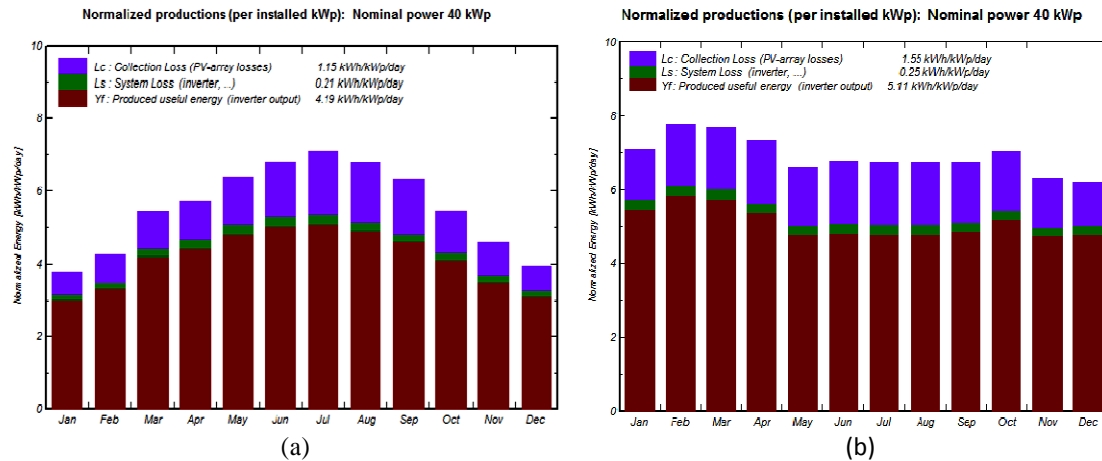


Fig.4. Normalized energy productions per installed kWp, in: a) Tamanrasset, b) Tunis.

### Economic evaluation

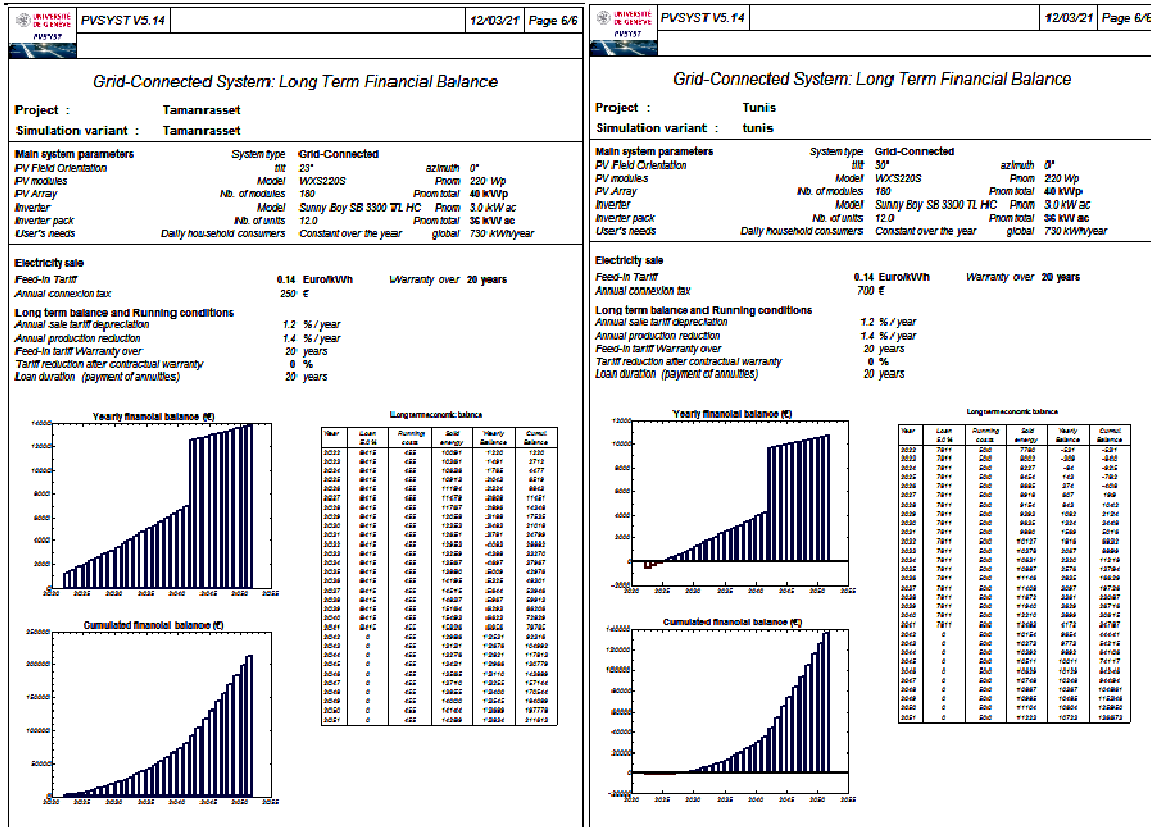
The costs of a solar PV system depends on several factors. Based on the international PV market, and to standardize the results, we have based ourselves on European prices, as long as the Algerian market is neither matured in this field nor administered yet, so Tunisia and Morocco follow Europe. As a result, it has found that the overall price of our system which will be the same for all the sites considered, so that we can evaluate the return on investment for each site following its production. The mean obtained results are so that system productions, normalized productions, producible, Fields losses, performance indexes, and system losses are respectively in:

- Tamanrasset: 73863 kWh/year, 5.11 kWh/kWc/day, 1866 kWh/kWc/year, 1.55 kWh/kWc/day, 0.739, and 0.25 kWh/kWc/day.
- Tunis: 60571 kWh/year, 4.20 kWh/kWc/day, 1533 kWh/kWc/year, 1.14 kWh/kWc/day, 0.756, and 0.21 kWh/kWc/day.

According to the results obtained from an economic evaluation of our system connected to the grid, we notice that the overall net investment does not have too different values except in the case of Algiers and Tamanrasset, which is reflected in the products imported from Europe, and also the working conditions in the south. Then, and following the same economic evaluation and considering the annual production of the system and the return of inversion over 20 years, it was deduced that the cost of the energy produced is the same value of 0.16 for Perpignan and Algiers, also the same value for Tunis and Casablanca of 0.14 €/kWh, the maximum cost price per kWh is that of Frankfurt at 0.23 €/kWh, while the minimum value is that of 0.12 €/kWh reached for Tamanrasset.

The analysis of the long-term financial balance sheet (Fig. 5) revealed that our system is not profitable in Frankfurt site or a similar weather data site, because we notice that we can sell energy, but the gain amortizes the amount of the project. As for Algiers site, our system can give a positive gain in only 15 years, while in Casablanca the return on profitable in the Frankfurt site or a similar weather data site, because we notice that we can sell energy, but the gain investment is only 11 years. An installation in Tunisia is profitable after five (5) years, while the most fabulous is the Tamanrasset site, which has made a perfect profit since the first day of operation. For this analysis, we considered the sales rates in Europe, Tunisia, and Morocco which are equal to 13.75 €. An accurate analysis reveals how the cost of the energy used about 0.14 €/kWh is low. As the annual connexion tax costs 250 € with a warranty over 20 years.

---



(a)

(b)

Fig.5.Economic evaluation(financial report)of the system in:a)Tamanrasset,b)Tunis.

This techno-economic analysis of PV-based power supply system for a remote telecom mobile basestation could be of a great interest. For TNs, a PV system is an alternative for conventional standalone diesel configuration not economically feasible due to the high cost of diesel. Such choice should have significant effect on the operating cost of the mobile telecom operation and also environmental impact due to high CO2 emissions from the system. As a perspective, we aim to configure a PV/Wind hybrid system to supply a BTS to help tourists enjoy their holidays and avoid them getting lost in the hilly areas of Tamanrasset.

2. CONCLUSION

Simulated performance of 39.6 kWp grid connected Si-poly PV system is performed using PVsyst software (as a simulation tool). The energy production varies in Tamanrasset regarding to the power, quality of PV module and energy converters: that is why the German Academy chosen such site for the launched famous desert project. From this simulation and by comparing between Tamarasset and Tunis sites, these points should be noticed:

- Annually, 73.86 MWh/year is the injected into-grid energy in Tamarasset site with

specific production on annual basis per installed kWp is 1866 kWh/kWp/year.

- A maximum of injected into-grid energy in such site found to be 7387 kWh was mentioned in March, and a minimum energy of 5909 kWh was noticed in November.
  - The planned PV system should provide operational benefits to installed BTS of TNs in Taman asset, and such study can be performed by the use of different PV module technologies with appropriate installation methods for improving performances. Finally, PV based-REs for TNs can be competitive and may even save consumers money today and in the future.
-

## REFERENCES

- [1] S. Taylor Chowdhury, S. P. Chowdhury, A. K. Saha and Y. H. Song, Modelling, simulation and performance analysis of a PV array in an embedded environment, 42nd International Universities Power Engineering Conference 2007; Brighton 781-785. doi:10.1109/UPEC.2007.4469048
- [2] H. Beltra, E. Bilbao, E. Belenguer, I. Etxeberria-Otadui et al., Evaluation of Storage Energy Requirements for Constant Production in PV Power Plants. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2013; 60 (3) 1225-1234. doi:10.1109/TIE.2012.2202353
- [3] T. MA, H. Yang and L. Lu, Solar photovoltaic system modeling and performance prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2014; 36:304-315. doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.057
- [4] M.S. Haitham Bahaidarah, Experimental performance evaluation and modeling of jet impingement cooling for thermal management of photovoltaics, *Solar Energy* Volume 2016; 135:605-617. doi.org/10.1016/j.solener.2016.06.015
- [5] T. Adefarati, R. C. Bansal, Reliability assessment of distribution system with the integration of renewable distributed generation, *Applied Energy* 2017; 185(1) 158-171. doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.087
- [6] Yushchenko A, Bono A, Chatenoux B, Kumar M, Ray P N, GIS-based assessment of photovoltaic (PV) and concentrated solar power (CSP) generation potential in West Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018; 81(2) 2088-2103. doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.021
- [7] K. Siraganyan, A. D. Perera, J-L. Scartezzin, D. Mauree, Eco-Sim: A Parametric Tool to Evaluate the Environmental and Economic Feasibility of Decentralized Energy Systems, *Energies* 2019; 12 (5) 776. doi.org/10.3390/en12050776
- [8] E. Moe, Does politics matter? Explaining swings in wind power installations, *AIMS Energy* 2017; 5(3), 341-373. doi.org/10.3934/energy.2017.3.341.
- [9] S. N. Roy, "Energy logic: A road map to reducing energy consumption in telecommunications networks," in *INTELEC; 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference*, San Diego, CA, 2008; 1-9. doi.10.1109/INTLEC.2008.4664025
- [10] G. Koutitas, and P. Demestichas, Challenges for Energy Efficiency in Local and Regional Data Centers. *Journal of Green Engineering*; 2010:1-32. River Publishers.
- [11] S. Hashimoto, et al., "A new stand-alone hybrid power system with wind generator and photovoltaic modules for a radio base station," *INTELEC 2004. 26th Annual International Telecommunications Energy Conference*, Chicago, IL, USA, 2004, 254-259. doi:10.1109/INTLEC.2004.1401475
- [12] T. Ackermann, T. Prevost, V. Vittal, A. J. Roscoe, J. Matevosyan and N. Miller, "Paving the Way: A Future Without Inertias Closer Than You Think," in *IEEE Power and Energy Magazine* 2017; 15(6) 61-69. doi:10.1109/MPE.2017.2729138
- [13] D. Gielen, F. Boshell, D. Saygin, M. D. Bazilian, N. Wagner, R. Gorini, The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews* 2019; 24:38-50. doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006
- [14] C. Clauser and M. Ewert, The renewables cost challenge: Levelized cost of geothermal electric energy compared to other sources of primary energy - Review and case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2018; 82(3) 3683-3693. doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.095
- [15] McElroy MB and Chen X, Wind and solar power in the United States: status and prospects, in *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2017; 3(1) 1-6. doi:10.17775/CSEEJPES.2017.0002
- [16] [https://www.pvsyst.com/help\(PVsyst6HelpDoc\)](https://www.pvsyst.com/help(PVsyst6HelpDoc)).
- [17] Vikrant Sharma, S.S. Chandel, Performance analysis of a 190 kWp grid interactive solar photovoltaic power plant in India, *Energy* 55(2013) 476-485.
- [18] M. Irwanto, Y. M. Irwan, I. Safwati, W. Leow and N. Gomesh, "Analysis simulation of the photovoltaic output performance," *2014 IEEE 8th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO 2014)*, Langkawi, Malaysia, 2014, pp. 477-481, doi:10.1109/PEOCO.2014.6814476.
- [19] [B. Shiva Kumar, K. Sudhakar, Performance evaluation of 10 MW grid connected



- 
- solarphotovoltaicpowerplantinIndia,EnergyReports 1(2015) 184–192.
- [20] Allouhi, A., Saadani, R., Kousksou, T., Saidur, R., Jamil, A., & Rahmoune, M. (2016). *Grid-connected PV systems installed on institutional buildings: Technology comparison, energy analysis and economic performance*. *Energy and Buildings*, 130, 188–201. doi:10.1016/j.enbuild.2016.08.054.
- [21] M. Malvoni, A. Leggieri, G. Maggioro, P.M. Congedo, M.G. De Giorgi Corrigendum To Long Term Performance, Losses And Efficiency Analysis Of A 960 Kwp Photovoltaic System In The Mediterranean Climate [Energy Conversion And Management 145 (2017) 169–181] Energy Conversion and Management, Volume 159, 1 March 2018, Pages 413.
- [22] G. Pillai, H.A. Yaqoob Naser, Techno-economic potential of large scale photovoltaics in Bahrain, Sustainable Energy Technologies and Assessments 27(2018)40–45.
- [23] M. R. Akhtari, M. Baneshi, Techno-economic assessment and optimization of a hybrid renewable co supply of electricity, heat and hydrogen system to enhance performance by recovering excess electricity for a large energy consumer, Energy Conversion and Management 188(2019)131–141.
- [24] S. Thotakura, S. Chandan Kondamudi, J. F. Xavier, M. Quanjin, G. R. Reddy, P. Gangwar, S. L. Davuluri, (2020). Operational performance of megawatt-scale grid integrated rooftop solar PV system in tropical wet and dry climates of India. Case Studies in Thermal Engineering, 100602. doi:10.1016/j.csite.2020.100602.
- [25] S. Goel, R. Sharma, Analysis of measured and simulated performance of a grid-connected PV system in eastern India, Environment, Development and Sustainability (2021) 23:451–476. doi.org/10.1007/s10668-020-00591-7.
- [26] Mohamed A. Eltawil, Zhengming Zhao, Renewable and Sustainable Energy Reviews 2010; 14:112-129.
- [27] IEC. Photovoltaic System Performance Monitoring-Guidelines for Measurement Data Exchange and Analysis. IEC Standard 61724. Geneva Switzerland; 1998.
- [28] Nallapaneni Manoj Kumar, M. Rohit Kumar, P. Ruth Rejoice, Mobi Mathew, Energy Procedia 117(2017)180–189.